



Ilkka Tieaho

Roudan syvyyden ja routanousun mallintaminen Luoman koe-kohteessa

Pohjarakennuksen ja maamekaniikan syventymiskohteen diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27.5.2013

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: Yliopisto-opettaja Henry Gustavsson

Tekijä Ilkka Tieaho

Työn nimi Roudan syvyyden ja routanousun mallintaminen Luoman koekohteessa

Laitos Rakennustekniikka

Professori Pohjarakennus ja maamekaniikka

Professuurikoodi Rak-50

Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t)/Työntarkastaja(t) DI Henry Gustavsson

Päivämäärä 27.5.2013

Sivumäärä 97+20

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Suomen ilmasto on talvisin kylmä ja sääolosuhteista riippumatta rakentaminen on Suomessa ympärivuotista. Tästä johtuen Suomi kuuluu alueeseen, jossa roudan vaikutukset ympäristöön pitää ottaa aina huomioon suunnittelussa ja rakentamisessa. Routaantumisen ja routimisen haittavaikutukset voidaan minimoida ja parhaassa tapauksessa suurimmaksi osin eliminoida oikeanlaisella suunnittelulla ja toteutuksella. Rakenteen mitoitus edellä esitetyn mukaisesti on mahdollista toteuttaa onnistuneesti, jos tunnetaan roudan vaikutukset ympäristöön – erityisesti roudan syvyys ja routanousun suuruus.

Tämän työn tarkoituksen oli selvittää, kuinka erilaiset laskenta- ja arviointimenetelmät mallintavat roudan syvyyttä ja routanousua. Koekohteena oli Luoman seisakkeen pysäköintialue Kirkkonummella. Vertailupohja laskentamenetelmien tuloksille luotiin maanpinnan vaaitusten ja ilman sekä maaperän lämpötilamittausten avulla. Laskennoissa käytetyt parametrit määritettiin laboratoriokokein.

Routanousun suhteen keskeinen routanousukerroin määritettiin routanousukokeella säähuoneessa. Maa-ainesten routanousukertoimet määritettiin 0, 20 ja 40 kPa:n kuormilla. Lisäksi routanousukertoimet määritettiin koekohteen havaintojen perusteella takaisinlaskennalla. Routivuutta arvioitiin myös ISSMFE:n esittämien routivuuskriteerien mukaisesti.

Koekohteen roudan syvyyden ja routanousun mallinnukseen käytettiin neljää eri menetelmää. Käsinslaskennalla roudan syvyyttä ja routanousua arvioitiin alan kirjallisuudessa ja ohjeissa esitetyn perusteella. Lisäksi työssä käytettiin kolmea tietokoneohjelmaa roudan mallintamiseen. SSR- ja GB Frost-malleilla voitiin arvioida sekä routanousua että roudan syvyyttä. Temp/W:llä voitiin arvioida ainoastaan roudan syvyyttä. Temp/W:llä tehty arvio routanoususta määritettiin roudan syvyyden perusteella käsinslaskennan avulla. Kaikkien työssä käytettyjen laskentamenetelmien tulosten perusteella voidaan todeta, että työssä käytetyt menetelmät kuvasivat koekohteen havaintoja hyvällä tarkkuudella.

Avainsanat Geotekniikka, roudan mallintaminen, roudan syvyys, routanousu, routanousukoe, routanousukerroin

Author Ilkka Tieaho		
Title of thesis Modeling of frost depth and frost heave in the Luoma test site		
Department Civil and Structural Engineering		
Professorship Soil mechanics and Foundation Engineering		Code of professorship Rak-50
Thesissupervisor Professor Leena Korkiala-Tanttu		
Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s)) M. Sc. Henry Gustavsson		
Date 27.05.2013	Number of pages 97+20	Language Finnish

Abstract

Construction work in Finland is a year-round operation, regardless of the challenges that the cold Finnish winter presents. Finland is located in a region where frost effects must always be taken into consideration as a part of designing and construction work. Consequently, the adverse effects of frost can be minimized and at best nearly eliminated by appropriate designing and execution. Moreover, structural designing can be executed successfully if the effect that frost, particularly frost depth and frost heave, has on the environment is known.

The purpose of this study was to analyze how various calculation and evaluation methods model frost depth and frost heave. The field tests were carried out at Luoma halt's parking lot in Kirkkonummi. The basis for the comparison of the results of the calculation methods was created with the use of surface leveling and temperature measurements. Air and soil temperature measurements were also recorded. The parameters used in the calculations were determined by laboratory tests.

The frost heave coefficient (SP), which is a significant factor when quantifying frost heave, was determined by frost heave tests in laboratory circumstances. The soil frost heave coefficients were established by 0, 20 and 40 kPa loads. Furthermore, the frost heave coefficients were also determined on the basis of test site observations by back-calculation. In addition frost-susceptibility was estimated with ISSMFE's frost-susceptibility criteria.

Four different methods were used in order to model the insitu frost depth and frost heave of the test site. Manual calculations were performed to evaluate the frost depth and frost heave, based on the established literature and guidelines of the scientific discipline. In addition, three different computer software programs, SSR, GB Frost and Temp/W, were used to model frost phenomena. SSR and GB Frost are capable of estimating both frost heave and frost depth, whereas Temp/W is only able to determine the frost depth. Thus, in the case of Temp W, the assessment of the frost heave was based on manual calculation. It can be concluded that the results achieved with the chosen evaluation methods reflected the test site observations with a good degree of accuracy.

Keywords Geotechnical, frost modeling, frost depth, frost heave, frost heave test, frost heave coefficient

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa yliopisto-opettaja Henry Gustavssonin ohjauksessa. Työtä valvoi professori Leena Korkiala-Tanttu. Työn aikana tehtiin yhteistyötä yli-insinööri Veli-Antti Hakalan, laboratorioteknikko Matti Ristimäen, laboratorioinsinööri Matti Lojanderin ja DI Seppo Salmenkaidan (Geobitti Oy) kanssa.

Haluan edellä mainittujen henkilöiden lisäksi vielä kiittää koko pohjarakennuksen ja maamekaniikan henkilökuntaa. Lisäksi työn aikana sain korvaamattomia neuvoja ja kommentteja dosentti Seppo Saarelaiselta.

Lopuksi haluan kiittää koko sydämestäni vanhempiani vuosien varrella saamastani tuesta – tyttöystävääni ymmärryksestä ja kannustuksesta.

Espoo 27.5.2013

Ilkka Tieaho

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät	7
Lyhenteet.....	9
1 Johdanto	10
2 Routa ilmiönä	12
2.1 Routa ja ilmiöön liittyviä käsitteitä	12
2.2 Maa-aineksen routivuus	13
2.3 Routimiskriteerit.....	14
2.3.1 Yleistä	14
2.3.2 Rakeisuus	15
2.3.3 Kapillaarinen nousukorkeus	16
2.3.4 Konsistenssi	17
2.3.5 Hienoustekijä.....	18
2.3.6 Vedenläpäisevyys.....	18
2.3.7 Routanousukokeet	19
2.4 Maan lämpötekniset ominaisuudet	19
2.4.1 Maan routaantumiseen vaikuttavat tekijät	19
2.4.2 Lämmönjohtavuus.....	19
2.4.3 Ominaislämpö ja tilavuuslämpökapasiteetti	22
2.4.4 Olomuodonmuutoslämpö.....	23
2.5 Maan routaantuminen ja roudan syvyyden arviointimenetelmät	23
2.5.1 Yleistä	23
2.5.2 Roudan syvyyden laskennallinen arvio.....	24
2.5.3 Roudan syvyyden likimääräinen arvio	27
2.6 Routanousu	28
2.6.1 Routimisilmiö.....	28
2.6.2 Segregaatiopotentiaali-teoria.....	29
3 Routanousukoe – mitattavat suureet ja koelaitteisto	32
3.1 Määritelmät ja mitattavat suureet	32
3.1.1 Määritelmiä ja kaavoja	32
3.1.2 Segregaatiopotentiaali ja routanousukerroin.....	33
3.2 Koelaitteisto.....	34
3.2.1 Yleistä	34
3.2.2 Routaselli	35
3.2.3 Mittauslaitteisto.....	37
4 Tutkimuskohde – Luoman seisakkeen pysäköintialue.....	39
4.1 Alueen kuvaus	39
4.2 Pohjatutkimukset	41
4.3 Laboratoriokokeet	43
4.4 Routanousukoe	44
4.4.1 Yleistä	44
4.4.2 Näytteen asennus selliin	44
4.4.3 Näytteen valmistaminen kokeisiin	45
4.4.4 Kuormittamaton koe.....	46
4.4.5 Sulatukset	47

4.4.6	Kuormitetut kokeet.....	47
4.4.7	Mittaustietojen keruu	47
4.4.8	Kokeen lopetus, näytteen purkaminen ja tulokset	47
4.5	Kohteen tarkkailumittaukset ja havainnot	48
4.5.1	Ilman lämpötilamittaukset ja laitteisto	48
4.5.2	Maaperän lämpötilamittaukset ja laitteisto	49
4.5.3	Routanousuhavainnot ja laitteisto	51
4.6	Maa-ainekset	52
4.6.1	Routanousukoenäytteet	52
4.6.2	Parkkipaikan rakennekerrokset	53
4.6.3	Koekuopan maa-ainekset	54
5	Maa-ainesten routivuus	55
5.1	Routivuus luokitusominaisuuksien perusteella	55
5.2	Routanousukerroin (SP) routanousukokeiden perusteella.....	55
5.2.1	Näyte F2 – parkkipaikan rakennekerros, srHkMr.....	55
5.2.2	Näyte F6 – koekuopan ylempi syvyys, saSi	58
5.2.3	Näyte F11 – koekuopan alempi syvyys, laSa.....	61
5.3	Routanousukerroin (SP) kenttähavaintojen perusteella.....	63
6	Routaan liittyvien ilmiöiden laskentamenetelmät	66
6.1	Käsinlaskenta.....	66
6.2	Tietokoneohjelmat	66
6.2.1	SSR-malli	66
6.2.2	Temp/W.....	67
6.2.3	GB- Frost.....	67
7	Tulokset.....	69
7.1	Yleistä tuloksista	69
7.2	Luoman koekohteen havainnot – mallintamisen vertailudata	70
7.3	Routivuuden vertailu	71
7.4	Laskentamenetelmät routanousulle ja roudan syvyydelle	72
7.4.1	Käsinlaskenta	72
7.4.2	SSR-malli	77
7.4.3	GB-Frost.....	81
7.4.4	Temp/W.....	84
7.5	Eri laskentamenetelmien tulosten vertailua.....	91
8	Johtopäätökset	93
	Lähdeluettelo.....	94
	Liiteluettelo	97
	Liitteet	

Merkinnät

B	[kg]	astian massa
B _k	[kg]	astia+näyte kuivana
B _m	[kg]	astia+näyte märkänä
C _f	[Wh/m ³ K]	tilavuuslämpökapasiteetti jäätyneenä
C _u	[Wh/m ³ K]	tilavuuslämpökapasiteetti sulana
D ₁₀	[mm]	rakeisuuskäyrän 10%:n läpäisyarvoa vastaava raekoko
D ₆₀	[mm]	rakeisuuskäyrän 60%:n läpäisyarvoa vastaava raekoko
F	[Kh]	pakkasmäärä talven alusta lukien
I	93 Wh/kg	veden jäätymislämpö
I _c	[%]	konsistenssiluku
I _i	[%]	juoksevuusluku
I _p	[%]	plastisuusluku
L _s	[J/m ³]	maan jäätymislämpö
L _w	[J/kg]	veden jäätymislämpö
Q	[J]	lämpömäärä
R _f		hienoustekijä
SP(t)	[mm ² /Kh]	segregaatiopotentiaali
SP ₀	[mm ² /Kh]	routanousukerroin (alaindeksi 0-kuorma)
T	[K/°C]	lämpötila
T ₋	[K]	näytteen pinnan lämpötila
T _a	[°C]	pakkaskauden keskilämpötila
T _m	[°C]	vuoden keskilämpötila,
V	[m ³]	näytteen tilavuus
Z	[m]	roudan syvyys
Z _j	[mm]	jäätyneen näytteenosan korkeus
Z _s	[mm]	sulan näytteenosan korkeus
c	[J/kgK]	ominaislämpö
c _i	[J/kgK]	jään ominaislämpö
c _s	[J/kgK]	maan ominaislämpö
c _t	[J/kgK]	ominaislämpö lämpötilassa T
c _w	[J/kgK]	veden ominaislämpö
c _v	[J/m ³ K]	tilavuuslämpökapasiteetti
c _{vf}	[J/m ³ K]	jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti
c _{vu}	[J/m ³ K]	sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti
c _{wv}	[J/m ³ K]	veden tilavuuslämpökapasiteetti
g	[m/s ²]	maan putoamiskiihtyvyys
gradT	[K/m]	osittain jäätyneen kerroksen lämpötilagradientti
h	[mm]	routanousu
h(t)	[m/h]	routanousunopeus
k		routaantumiskerroin,
m	[kg]	massa
w	[%]	vesipitoisuus
v	[mm/h]	routanousunopeus
w _i	[%]	juoksuraja
w _p	[%]	plastisuusraja

w_u	[%]	jäätyneessä maassa sulana pysyvä veden määrä
v_w	[m/h]	veden virtausnopeus jäälinssiin,
w_{vol}		tilavuusvesipitoisuus
x_i		jään suhteellinen osuus
x_s		maa-aineksen suhteellinen osuus
x_w		veden suhteellinen osuus
z_o	[mm]	päällyrakenteen paksuus
Δh	[mm]	routanousun muutos mittausvälillä
Δt	[h]	mittauksen aikaväli tunteina
γ	[kN/m ³]	märkätilavuuspaino
γ_d	[kN/m ³]	kuivatilavuuspaino
ε_f		routanoususuhde
λ_f	[W/mK]	jäätyneen maan lämmönjohtavuus
λ_l	[W/mK]	lämmönjohtavuuden laskenta-arvo
λ_u	[W/mK]	sulan maan lämmönjohtavuus
ρ	[kg/m ³]	tiheys
ρ_d	[10 ³ kg/m ³]	maa-aineksen kuivairtitiheys
ρ_i	[kg/m ³]	jään tiheys
ρ_w	[kg/m ³]	veden tiheys

Lyhenteet

CRREL	United States Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory
CEN	European Committee for Standardization
GLO	Geotekniset laboratorio-ohjeet
ISO	International Organization for Standardization
ISSMFE	International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien liitto
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
SGY	Suomen geoteknillinen yhdistys
TPPT	Tien pohja- ja päällysterakenteet tutkimusohjelma
TVH	Tie- ja vesirakennushallitus
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

1 Johdanto

Kylmän ilmaston alueilla maaperä jäätyy. Maaperän jäätyminen seurauksena syntyvät maaperän liikkeet ja ilmiöt tulee huomioida rakentamisessa ja suunnittelussa. Sijainnista ja ympärivuotisesta rakentamisesta johtuen Suomi kuuluu alueeseen, jossa roudan vaikutukset ympäristöön pitää ottaa huomioon.

Routivan maaperän synnyttämä routapaine vaikuttaa kaikkiin maassa oleviin rakenteisiin. Mikäli routapaine on suurempi kuin rakenteen paino tai lujuus, aiheuttaa tämä ilmiö rakenteen liikkumisen tai rikkoutumisen. Routanousu on useimmiten epätasaista johtuen rakennuspohjan ominaisuuksista ja veden epätasaisesta virtauksesta routarajalle. (VTT 1997.) Maan vertikaalinen liike aiheuttaa rakenteelle epäsuotuisaa taivutusta ja mahdollisesti vaurioita ja haittaa. Tämän seurauksena voi syntyä rakennevaurioita, jotka johtavat omaisuusvahinkoihin tai pahimmassa tapauksessa henkilövahinkoihin. (RIL 261 2013.) Lisäksi rakenteen vuorollinen jäätymis- ja sulamissykli ei ole toivottavaa rakenteen kestävyyskannalta.

Maarakenteita mitoitettaessa routanousun arvioiminen on keskeinen tehtävä. Suunnittelun ja mitoituksen yhteydessä vaurioitumisriskiä hallitaan rajoittamalla routanousua (RIL 261 2013). Roudan aiheuttamia haittavaikutuksia pyritään estämään ja vähentämään rakenteen perustusten sijoittamisella roudattomaan syvyyteen tai routaeristeiden käytöllä (Saarelainen 1992).

Routanousun aiheuttamat siirtymät sallitaan siinä määrin, etteivät ne rajoita rakenteen käyttöä tai aiheuta sille vaurioita (Saarelainen 1992). Rakenteen mitoitus on edellä esitetyn mukaisesti mahdollista suorittaa, jos tunnetaan roudan vaikutukset ympäristöön – erityisesti roudan syvyys ja routanousun suuruus.

Tähän työhön liittyvää aineistoa löytyi kattavasti. Jo 1800-luvulta lähtien on tehty työn kannalta tärkeitä havaintoja roudan ilmiöistä. Tällöin havaittiin pakkasmäärän yhteys roudan syvyyteen, joka on mallia $Z = k\sqrt{F}$ (Stefan 1891).

Tässä työssä routanousuilmiötä tutkittaessa keskeiseen asemaan nousi segregaatipotentiaali-teoria. Tämän teorian ovat luoneet Konrad & Morgenstern (1981) ja se nousi 1980-luvulta lähtien hallitsevaksi routanousuilmiön selittäjäksi routatieteen alalla (Saarelainen 1986). Routanousun laskemisen kannalta työn oleellisin parametri oli routanousukerroin (SP). Routanousukerroin on johdettu edellä esitetystä teoriasta, ja esitelty tarkemmin Saarelaisen (1992) väitöskirjassa SSR-mallin yhteydessä. Routanousukokeen prosessia oli aiemmin tarkastellut muun muassa Pesu (2010). Lisäksi rakennusalan ohjeista RIL 261-2013 oli merkittävässä roolissa työn kannalta.

Tämän työn tavoitteena oli tarkastella roudan syvyyttä ja routanousun suuruutta erilaisilla laskentamenetelmillä. Laskentamenetelmien tuloksia vertailtiin koekohteessa havaittuihin arvoihin. Lisäksi arvioitiin eri laskentamenetelmien tulosten keskinäistä yhteensopivuutta. Koekohteena oli Luoman seisakkeen pysäköintialue.

Roudan syvyyden ja routanousun mallinnukseen käytettiin neljää erilaista menetelmää. Käsineläskennalla roudan syvyyttä ja routanousua arvioitiin alan kirjallisuudessa ja ohjeissa esitettyjen teorioiden ja likimääräiskaavojen perusteella. Lisäksi työssä käytettiin kolmea tietokoneohjelmaa roudan ilmiöiden mallintamiseen. SSR ja GB Frost –mallilla

voitiin arvioida sekä routanousua että roudan syvyyttä. Temp/W:llä arvioitiin ainoastaan roudan syvyyttä ja arvio routanoususta määritettiin ohjelmalla määritetyn roudan syvyyden perusteella käsinlaskentaa käyttäen.

Roudan ilmiöiden kehittymistä tarkasteltiin, mikäli tämä oli laskentamenetelmällä mahdollista ja tarkoituksenmukaista. Lisäksi työssä esitettiin menetelmien käyttökokemuksia raportin kirjoittajan näkökulmasta. Johtopäätökset osuudessa on lyhyesti arvioitu mahdollisia jatkotutkimussuosituksia.

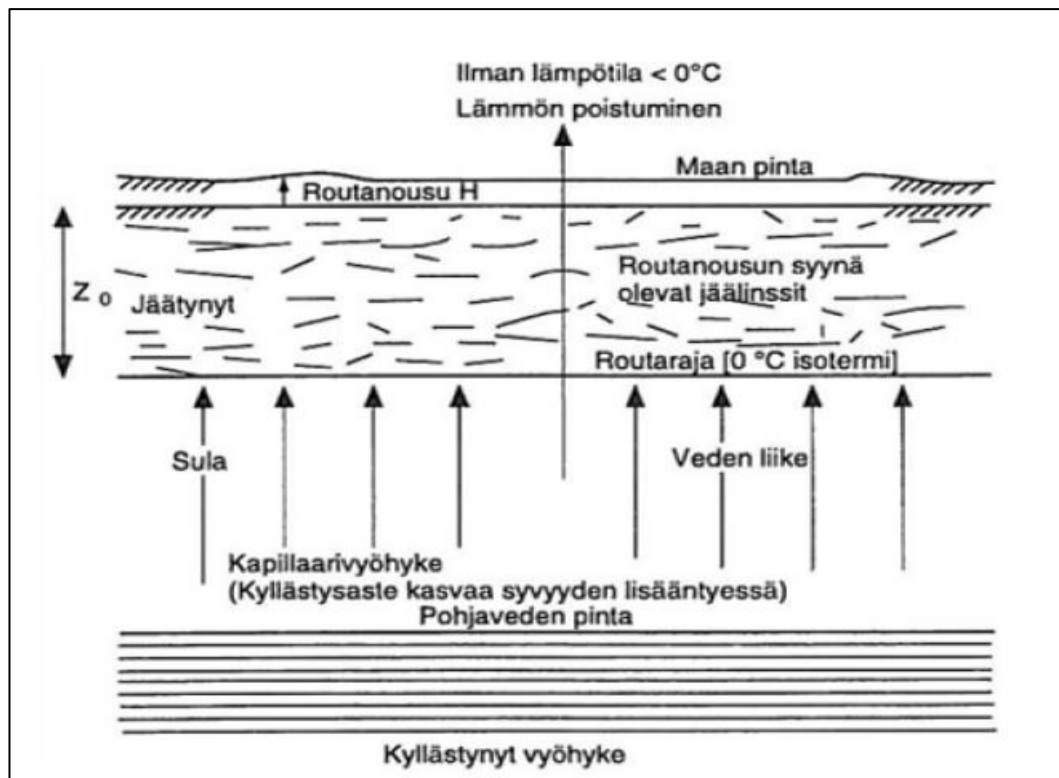
2 Routa ilmiönä

2.1 Routa ja ilmiöön liittyviä käsitteitä

Maaperän lämpötila on riippuvainen lämmönvaihdosta, jota tapahtuu maanpinnan ja maaperän välillä. Rajapintojen välillä tärkein lämmönsiirtomekanismi on konduktio eli johtuminen. Maaperän lämpötilan laskiessa alle huokosveden jäätymisrajan maaperä alkaa jäätymään. (Saarelainen 1992.) Riippuen maalajista huokosveden jäätymisraja voi vaihdella huomattavasti. Esimerkiksi savissa voidaan havaita jäätyvätöntä huokosvettä $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa, kun taas siltin huokosvesi on pääosin jäähtynyt heti lämpötilan laskiessa alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n. (Konrad & Morgenstern 1980.)

Seuraavassa on kuvattu routaan liittyviä käsitteitä. Käsitteitä on havainnollistettu kuvassa 2.1.

Routa	tarkoittaa maakerrosta, joka on syntynyt maa-aineksen huokosveden jäätyksen seurauksena (Onninen 2001a).
Routaantuminen	on huokosveden ja maaperän jäätymistä kuvaava käsite (Onninen 2001a).
Routimisella	ymmärretään ilmiö, jossa maakerroksen tilavuus kasvaa sen routaantuessa (Saarelainen 1992).
Routaraja	on jäätyneen maakerroksen alapinta.
Roudan syvyydellä	tarkoitetaan routarajan etäisyyttä alkuperäisestä maanpinnasta. Käsite kuvastaa jäätyneen maakerroksen paksuutta. Maaperän ja huokosveden jäätymisestä aiheutuvaa routanousua ei sisällytetä roudan syvyyden laskentaan (Onninen 2001).
Routanousu	on maanpinnan pystyliikettä maan routiessa.
Sulamissyvyys	kuvastaa routakerroksen yläpinnan etäisyyttä maanpintaan.
Sulamispainuma	on talven aikana muodostuneen routanousun palautumista.
Kelirikko	on kantavuuden heikkenemistä sulamisvaiheessa.



Kuva 2.1. Routimiseen liittyviä ilmiöitä (Hafeez 1993).

2.2 Maa-aineksen routivuus

Routivuudella tarkoitetaan todennäköisyyttä, että maa-aines jäätyessään paisuu ja routii. Routimiskriisi on huomattavan suuri erittäin routivalla maalla, kun taas routimaton maa ei roudi ollenkaan tai niin vähäisessä määrin ettei sitä tarvitse ottaa huomioon suunnittelussa. (RIL 261 2013.)

Maan routimiselle on yleisesti pidetty edellytyksenä, että (Saarelainen 1992)

- maa jäätyy
- jäätyvä maa-aines on routivaa
- jäätymisrintamaan kulkeutuu vettä.

Jokainen edellä mainituista ehdoista tulee täyttyä, jotta jäälinssien muodostuminen on mahdollista. Lisäedellytyksenä routanousun syntymiselle on se, että routimisesta aiheutunut paine ylittää yläpuolisen rakenteen painon. (Nurmikolu 2005.)

Routanousun voimakkuutta voidaan kuvastaa monin eri tavoin. Maa-aineksen routanousun ennakointi sen luokitusominaisuuksien tai rakeisuuden perusteella on havaittu paikoin olevan epätasua ja -tarkkaa. Routanousun suuruutta voidaan arvioida onnistuneemmin routanoususuhteella (turpoamakerroin) ja routanousukertoimella SP (ks. kohta 3.1.2). (RIL 261 2013.)

Maakerrosten routimisen on todettu riippuvan maan jännitystilasta, maalajin huokoskojakautumasta, huokosveden laadusta, mineraalikoostumuksesta, vallitsevasta jännityksestä ja veden liikkeistä maassa. (RIL 261 2013.)

2.3 Routimiskriteerit

2.3.1 Yleistä

Routimiskriteeri kuvastaa maalajin taipumusta routimiseen. Routimista voidaan arvioida sekä laadullisena että määrällisenä ominaisuutena. Laadullisesti maalajit jaetaan routimattomiin, lievästi routiviin, keskinkertaisesti routiviin ja erittäin routiviin ryhmiin. Määrällisesti routivuutta voidaan kuvata esimerkiksi segregatiopotentiaalin (SP(t)) ja routanousukertoimen (SP) avulla. (Koskinen 1998.)

Maalajin routivuuden laadullisen arvioinnin käyttöä vaikeuttaa se, että varsinaista yksikäsitteistä vertailukohdetta ei ole olemassa. Käytännössä jokainen suunnittelu- ja rakennuskohde on oma kokonaisuutensa erilaisine ilmasto- ja pohjaolosuhteineen sekä toimintavaatimuksineen. Esimerkiksi ratasuunnittelu- ja talosuunnittelu poikkeavat huomattavasti sallittujen siirtymien osalta. Tästä syystä ei ole olemassa tiettyä routivuuskriteeriä, joka sopisi kaikkiin mahdollisiin tapauksiin vaan tilannetta arvioidaan tapauskohtaisesti olosuhteiden ja rakenteen toiminnalle asetettujen vaatimusten mukaisesti.. (Koskinen 1998.)

Maalajin routivuutta voidaan ennakoida tarkastellen sen tiettyjä materiaaliominaisuuksia. Kuitenkin routimisen ollessa mitoituksen kannalta kriittinen ominaisuus tulee routivuutta tarkastella laboratoriossa suoritettujen routanousukokeiden avulla. (Friberg & Slunga 1989.)

Routivuuskriteerit voidaan luokitella International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (TC-8) mukaan seuraaviin ryhmiin sen mukaan mihin ne perustuvat (ISSMFE 1989a)

Luokitusominaisuuksiin perustuvat routimiskriteerit ovat

- rakeisuus
- konsistenssi
- ominaispinta-ala ja huokoskojakauma
- hienoustekijä.

Hydraulisiin ominaisuuksiin perustuvat routimiskriteerit ovat

- kapillaarinen nousukorkeus
- vedenläpäisevyys.

Routanousukokeisiin perustuvat routimiskriteerit ovat

- segregatiopotentiaali (vakio- λ -lämpötilakokeesta)
- routanousunopeus (vakioroutaantumisnopeuskoe).

Lisäksi Chamberlain (1981) jakaa routivuuteen käytettävät kriteerit kolmeen tasoon, jonka perusteella

- taso I on raekojakaumaan perustuvat kriteerit
- taso II on edeltävää täydentävät ominaisuudet kuten konsistenssi, kapillaarisuus ja vedenläpäisevyys

- taso III on routanousukokeet laboratoriossa ja in situ-havainnot.

Yleisin tapa arvioida maan routivuutta on tarkastella maa-aineksen rakeisuusominaisuuksia. Lisäksi veden kapilaarista nousukorkeutta käytetään usein routivuuden arviointiperusteena. (RIL 261 2013.) Taulukossa 2.1 on esitetty maalajin routivuusluokitus erilaisten routivuuskriteerien perusteella.

Taulukko 2.1. Routivuuskriteerejä (ISSMFE 1989a).

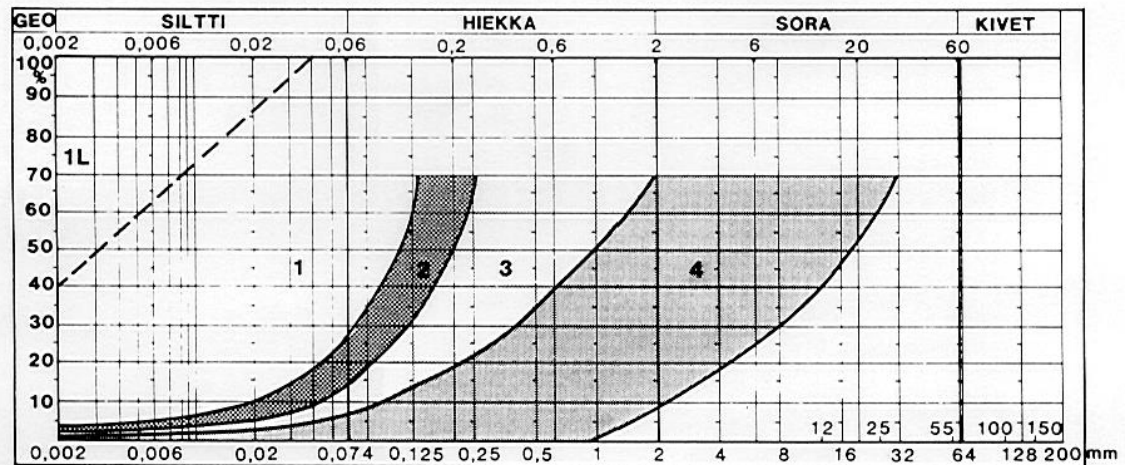
Routi- vuus- luokitus	PLASTISUUSKARTTA		Kapil- laari- suus, m	Juokse- vuuslu- ku I_L	Hie- nouste- kijä R_f	SP(t), mm ² /Kh	Rou- tanou- suno- peus, mm/d
	Maalaji (USCS luoki- tus)	Plastisuus- luku I_p ja juoksuraja w_L					
Routi- maton	GW, GP SW, SP	$I_p < 1$	< 1	≤ 0	$< 2,5$	$< 0,5$	$< 0,5$
Lievästi routiva	CH	$I_p \geq 7$ $w_L > 50$	1,0... 1,5	$< 0,25$	2,5... 5	0,5...1,5	0,5... 2
Keskin- kertai- sesti routiva	CL A-linjan yläp.	$I_p \geq 7$ $w_L = 35...50$	1,5... 2,0	0,25... 0,50	5...10	1,5...3,0	2...4
	OH, MH A-linjan alap.	$I_p \geq 7$ $w_L > 50$					
Erittäin routiva	CL, A-linjan yläp.	$I_p \geq 7$ $w_L < 35$	> 2	$> 0,5$	> 10	$> 3,0$	> 4
	ML, A-linjan alap.	$I_p \leq 4$ $w_L < 50$					
	OL, A-linjan alap.	$I_p \geq 7$ $w_L = 35...50$					

2.3.2 Rakeisuus

Maa-aineksen rakeisuuden tarkastelu on yleisimmin käytössä oleva routivuuden luokittelumenetelmä. Tämä menetelmä on nopea ja helppo suorittaa – tästä syystä menetelmän soveltuvuus isoihin projekteihin on erittäin hyvä. Edelleen, soveltuvuus pienen budjetin projekteihin on erinomainen kustannustehokkuuden ansiosta. (ISSMFE 1989a.)

Suurin osa rakeisuuteen perustuvista routivuuden luokittelumenetelmistä perustuu Casagranden vuonna 1931 määrittämään kriteeriin. Tämän mukaan, maalaji on routivaa, mikäli se sisältää yli 3 paino-% $< 0,02$ mm lajitetta ja samanaikaisesti raekokosuhte $D_{60}/D_{10} \geq 15$ tai yli 10 paino-% $< 0,02$ mm lajitetta kun $D_{60}/D_{10} \leq 5$. (Nieminen 1987.) Suomessa maa-aineksen routivuuden luokittelu rakeisuuden perusteella arvioidaan rakeisuuskäyrästä ja siihen määritellyn viiden eri osa-alueen mukaan.

Kuvassa 2.2, routivien maalajien rakeisuuskäyrät sijaitsevat alueella 1. Mikäli maalajien rakeisuuskäyrät sijaitsevat alueella 2, 3 ja 4 ovat maa-ainekset routimattomia, elleivät käyrien alapäävät pääty vasemmanpuoleisen rajakäyrän ulkopuolelle. (ISSMFE 1989a.) Rakeisuuskäyrät, jotka sijaitsevat 1L alueella ovat lievästi routivia. Tämä johtuu lihasen saven (savipitoisuus ≥ 40 %) alhaisesta vedenläpäisevyydestä. (SFS 2001.) Lisäksi alueen 2 maalajeista tulee tarkistaa kapilaarinen nousukorkeus. Rajatapauksissa, maalajin routivuus on syytä määrittää täsmällisemmällä menetelmällä (ISSMFE 1989a).



Kuva 2.2. Rakeisuuteen perustava routivuusluokitus (ISSMFE 1989a).

2.3.3 Kapillaarinen nousukorkeus

Suomessa kapillaarisen nousukorkeuden käyttö maa-aineksen routivuuden määrittämisessä on melko yleistä. Kapillaarisen nousukorkeuden mukaan maalajit voidaan erotella routiviin ja routimattomiin maalajeihin (Friberg & Slunga 1989). Kapillaarisuudella tarkoitetaan korkeutta johon maan huokosvesi nousee maaperässä. Nousukorkeuteen vaikuttavat esimerkiksi (Tie- ja vesirakennushallitus 1970).

- vapaan pohjaveden pinnan yläpuolinen pintajännitys
- maarakeiden ja veden välisen adheesion suuruus.

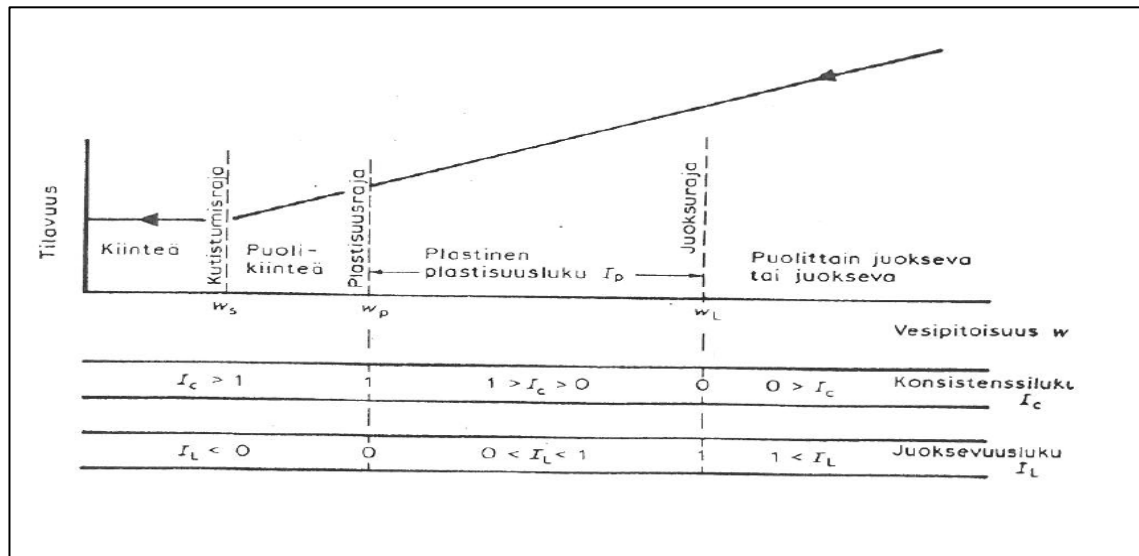
Kapillaariseen nousukorkeuteen perustuva routivuuskriteeri korreloi hyvin tarkasti laboratorioissa suoritettujen routanousukokeiden ja in situ-havaintojen antamiin tuloksiin savimaalajeja lukuun ottamatta (Friberg & Slunga 1989). Taulukossa 2.2 on esitetty maalajien routivuutta kapillaarisen nousukorkeuden perusteella.

Taulukko 2.2. Maalajien routivuus kapillaarisuuden perusteella (RIL 261 2013).

Routivuusryhmä	Maalaji (GEO)	Huom.
Yleensä routivaa	Sa Si saSi hkSi SiMr saSiMr hkSiMr siHkMr	Siltti voi muodostaa edulliset olosuhteet veden virtaukselle jäätymisrintamaan Kapillaarisuus > 2m
Routiva, jos jäätymisrintamaan voi kulkeutua riittävästi vettä	Mr HkMr SrMr siHk	Kapillaarisuus > 1...2m
Yleensä routimaton	HkMr SrMr hkSrMr srHkMr srHk hkSr Hk Sr	Kapillaarisuus < 1m

2.3.4 Konsistenssi

Konsistenssirajat tarkoittavat maan eri olomuotoja vesipitoisuusrajoina. Konsistenssiin vaikuttaa maalajin rakeisuus ja vesipitoisuus. Konsistenssirajoja käytetään maalajien luokituksessa arvioitaessa muun muassa maalajin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia, maarakennusominaisuuksia ja routivuutta. Maalajin konsistenssin ja routivuuden välillä on tutkimusten mukaan havaittu olevan voimakas korrelaationsuhde. (Frost i Jord 1976.) Maan eri olomuotojen vesipitoisuuden raja-arvoja voidaan käyttää maa-aineksen routivuuden arviointiin taulukon 2.1 mukaisesti. Kuvassa 2.3 on havainnollistettu maan eri konsistenssirajoja.



Kuva 2.3. Maan eri olomuodot (SGY 1985).

Kuiva tai alhaisen vesipitoisuuden maa-aines on kiinteää ja se murtuu hauraasti pienellä muodonmuutoksella. Vesipitoisuuden kasvaessa maa muuttuu muovailtavaksi plastisuusrajalla. Edelleen vesipitoisuuden lisääntyessä maa muuttuu juoksevaksi juoksurajalla. (CEN ISO/TS 17892-12:fi 2004.) Täysin vedellä kyllästetty maa kuivuu kutistumisrajaan asti, jonka jälkeen näytteen tilavuus ei enää muutu (SGY 1985).

Plastisuusluku (I_p) voidaan laskea kaavalla 1 (CEN ISO/TS 17892-12:fi 2004).

$$I_p = w_l - w_p \quad (1)$$

jossa

I_p	on plastisuusluku, [%]
w_l	on juoksuraja, [%]
w_p	on plastisuusraja, [%]

Plastisuusraja määritetään kierityskokeella ja juoksuraja kartiokokeella. Aiemmin juoksuraja tunnettiin hienouslukuna (F). Konsistenssirajoista voidaan määrittää juoksevuusluku kaavalla 2 ja konsistenssiluku kaavalla 3 (CEN ISO/TS 17892-12:fi 2004).

$$I_l = \frac{w-w_p}{I_p} \quad (2)$$

$$I_c = \frac{(w_l-w)}{w_l-w_p} \quad (3)$$

2.3.5 Hienoustekijä

Maalajin routivuuden on havaittu olevan voimakkaasti riippuvainen maa-aineksen hienoaineen eli 0,074 mm:n seulan läpäisseen aineen määrästä, hienoaineksen savipitoisuudesta ja juoksurajasta. Kaavassa 4 juoksuraja huomioi plastisten ja mineralogisten tekijöiden vaikutukset. (Rieke et al 1983.)

Hienoustekijä on muotoa (fines factor)

$$R_f = \frac{(hienoainepitoisuus)(savipitoisuus)}{(juoksuraja)} \quad (4)$$

Routivuuskriteerinä hienoustekijää on esitetty sovellettavaksi tilanteissa, joissa maa-aines on hienon ja karkean välissä. Menetelmän toimivuus on todennettu ainoastaan tilanteissa, joissa maa-aineksen alle 0,074mm partikkelien osuus on ≤ 20 %. (ISSMFE 1989a.)

2.3.6 Vedenläpäisevyys

Maa-aineksen vedenläpäisevyydellä on havaittu olevan vahva yhteys sen routivuuteen. Käytettäessä vedenläpäisevyyttä routivuuden arviointiperusteena huomioidaan, että savet ovat usein routimattomia tai lievästi routivia johtuen maalajin pienestä vedenläpäisevyydestä. Vedenläpäisevyyden avulla voidaan selvittää, onko maa-aines routivaa vai ei, mutta routivuuden astevaihtelua ja määrää ei ominaisuudella kyetä arvioimaan. (Friberg & Slunga 1989.) Taulukossa 2.3 on esitetty routivuuden arviointia vedenläpäisevyyden perusteella.

Taulukko 2.3. Routivuus vedenläpäisevyyden perusteella (Chamberlain 1981).

Routivuus	Kyllästetyn maan hydraulinen johtavuus k, m/s
Routimaton	$k \leq 1,0 \times 10^{-9}$
Rajatapaus	$1,0 \times 10^{-9} \leq k \leq 1,3 \times 10^{-9}$
Routiva	$1,3 \times 10^{-9} \leq k \leq 1,7 \times 10^{-6}$
Rajatapaus	$1,7 \times 10^{-6} \leq k \leq 1,0 \times 10^{-5}$
Routimaton	$k \geq 1,0 \times 10^{-5}$

2.3.7 Routanousukokeet

Maa-aineksen routivuutta kuvaava segregatiopotentialiaali (SP(t)) perustuu Konrad & Morgensternin (1980) kehittämään segregatiopotentialiaali-teoriaan. Routanousukokeissa voidaan määrittää maalajille ominainen segregatiopotentialiaali SP (t), joka kuvastaa maalajin routivuuden määrällistä voimakkuutta. (Onninen 2001b.). Suomessa routanousukokeesta yleensä määritetään niin sanottu routanousukerroin (SP).

Taulukossa 2.1 esitetään myös maalajin routivuusluokitus vakioroutaantumisenopeuden kokeesta määritetyn routanousunopeuden perusteella. Taulukon arvot perustuvat United States Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratoryn (CRREL) tutkimuksiin (Pesu 2010).

Routanousukokeen suorittamiselle ja koejärjestelyille ei ole olemassa kansainvälisesti vakiintunutta ohjetta tai standardia. Eri koejärjestelyiden välillä voidaan havaita eroja esimerkiksi jäähdytyslämpötiloissa. (Onninen 2001b.) Tässä työssä tehdyissä kokeissa pyrittiin noudattamaan VTT:ssä 1980-90-luvuilla kehitettyä routanousukoemenettelyä (vrt. Saarelainen 1992).

2.4 Maan lämpötekniset ominaisuudet

2.4.1 Maan routaantumiseen vaikuttavat tekijät

Maan lämpötekniisiä ominaisuuksia ovat lämmönjohtavuus, tilavuuslämpökapasiteetti ja olomuodonmuutoslämpö, tarkemmin jäätymis- ja sulamislämpö (Helander 1986). Maan lämpötekniset ominaisuudet ovat voimakkaasti yhteydessä maa-aineksen koostumukseen. Maa-aineksen koostumusta arvioidaan maan tiheyden, rakeisuusominaisuuksien, mineraalikoostumuksen ja vesipitoisuuden perusteella. Tarkastelutilanteissa usein maan lämmönjohtavuus ja tilavuuslämpökapasiteetti otaksutaan vakioiksi huokosveden ollessa likimäärin kokonaan sula tai jäätynyt. Olomuodonmuutoslämpö on verrannollinen jäätyneen ja sulaneen veden määrään. (RIL 261 2013.)

Kohteen lämpötilatietoja ja routanousukerrointa voidaan käyttää maan jäätyksen seurauksena muodostuvan routanousun laskemiseen ja arviointiin sekä roudan syvyyden laskentaan (VTT 1997).

2.4.2 Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuudella tarkoitetaan fysikaalista ominaisuutta, joka kuvaa aineen kykyä johtaa lämpöä. Maan lämmönjohtavuuteen vaikuttavat muun muassa (Kersten 1952)

- tiheys
- vesipitoisuus
- koostumus
- lämpötila
- mikrorakenne eli komponenttien tilavuusominaisuudet
- mikrogeometria
- mineralogia

Osatekijöiden yhteisvaikutus on matemaattisesti mahdollista määrittää komponentin lämmönjohtavuudeksi, mutta se on hankalaa (RIL 261 2013) ja kokonaisvaikutus mahdollisesti vähäarvoista työmäärään nähden. On arvioitu, että mikrogeometrian vaikutus on marginaalista, mikäli osa-aineskomponenttien lämmönjohtavuuden suhde on pienempi kuin 10. Edellä mainittu ehto toteutuu esimerkiksi vedellä kyllästetyssä maassa, kun taas osittain vedellä kyllästyneen materiaalin lämmönjohtavuuden määrittäminen tulisi tehdä kokeellisilla menetelmillä. (RIL 261 2013.) Eri aineiden lämmönjohtavuuksia on esitetty taulukossa 2.4.

Taulukko 2.4. Eri aineiden lämmönjohtavuuksia (Andersland & Ladanyi 1994).

Materiaali	Lämmönjohtavuus, W/mK, 0 °C:ssa
Ilma	0,026
Vesi	0,56
Jää	2,2
Kvartsi	8,4
Löyhä lumi	0,1
Tiivis lumi	0,5
Maasälpä	2
Graniitti	1,7-4,0
Asfaltti	1,28
Betoni	1,7

Vuonna 1949 Kersten kokeellisesti määrittänyt hienorakeisten ja karkearakeisten mineraalimaalajien lämmönjohtavuusarvoja jäätyneessä ja sulaneessa maassa kuivatilavuuspainon ja vesipitoisuuden perusteella (Helander 1986).

Jäätyneen maan lämmönjohtavuus on määritetty kokeellisesti kaavan 5 mukaiseksi – vakiot a...d on esitetty taulukossa 2.5 (Kersten 1949).

$$\lambda_f = a10^{b\rho_d} + c10^{d\rho_d w} \quad (5)$$

jossa ρ_d on kuivairtitiheys, [10^3 kg/m^3]
 λ_f on jäätyneen maan lämmönjohtavuus, [W/mK]
 w on vesipitoisuus, [%]
 a...d ovat vakioita

Taulukko 2.5. Jäätyneen maan lämmönjohtavuuden määrittämisessä käytettävät vakiot (a...d) hieno- ja karkearakeiselle maa-ainekselle.

vakio	hienorakeinen	karkearakeinen
a	0,0014	0,011
b	1,4	0,81
c	0,012	0,0046
d	0,5	0,91

Sulan maan lämmönjohtavuus lasketaan kaavan 6 mukaan – vakiot esitetty taulukossa 2.6 (Kersten 1949).

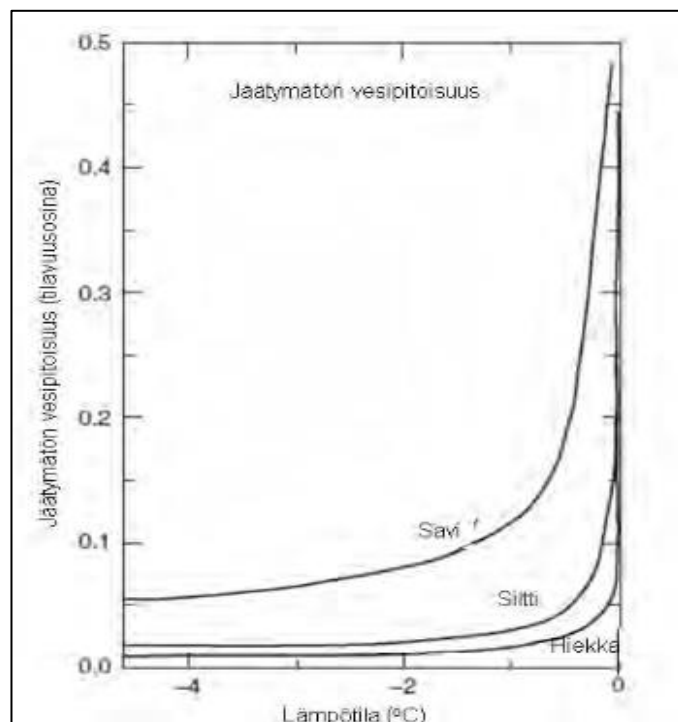
$$\lambda_u = (\alpha \log w + \beta)10^{0,62\rho_d} \quad (6)$$

jossa	λ_u	on sulan maan lämmönjohtavuus, [W/mK]
	α ja β	ovat vakioita
	ρ_d	on kuivavirtotiheys, [10^3 kg/m^3]
	w	on vesipitoisuus, [%]

Taulukko 2.6. Sulan maan lämmönjohtavuuden määrittämisessä käytettävät vakiot (α , β) hieno- ja karkearakeiselle maa-ainekselle.

vakio	hienorakeinen	karkearakeinen
α	0,13	0,1
β	-0,029	0,058

Kerstenin määrittämät kaavat eivät kuitenkaan ota huomioon jäätymättömän veden määrää. Lämpötilan laskiessa alle 0°C :n alkaa osa vedestä jäätymä ja muodostaa jäätä. Kuitenkaan koko vesimäärä ei jäädy samassa lämpötilassa. (RIL 261 2013.) Kuvassa 2.4 on havainnollistettu tilannetta.



Kuva 2.4. Edustavia arvoja jäätymättömän vesipitoisuuden lämpötilariippuvuudesta hiekassa, siltissä ja savessa (Osterkamp & Burn 2003).

Routanousulaskelmissa jäätymättömän veden määrä voidaan ottaa huomioon ja laskelmissa käytettävä lämmönjohtavuuden arvo johdetaan kaavaksi 7 (Friberg & Slunga 1989).

$$\lambda_l = \lambda_f + (\lambda_u - \lambda_f) \frac{w_u}{w} \quad (7)$$

jossa	λ_l	on lämmönjohtavuuden laskenta-arvo, [W/mK]
-------	-------------	--

λ_f	on jäätyneen maan lämmönjohtavuus, [W/mK]
λ_u	on sulan maan lämmönjohtavuus, [W/mK]
w_u	on jäätyneessä maassa sulana pysyvä veden määrä, [%]
w	on vesipitoisuus, [%]

2.4.3 Ominaislämpö ja tilavuuslämpökapasiteetti

Ominaislämpö kuvastaa lämpömäärää, joka tarvitaan nostamaan materian massayksikön lämpötilaa yhden asteen verran (kaava 8). Materiaalien ominaislämpöarvoja on esitetty taulukossa 2.7.

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (8)$$

jossa	c	on ominaislämpö, [J/kgK]
	Q	on lämpömäärä, [J]
	m	on massa, [kg]
	T	on lämpötila, [K]

Taulukko 2.7. Materiaalien ominaislämpöarvoja (Frost i Jord 1976).

Materiaali	Ominaislämpö, kJ/kgK, °C:ssa
Vesi	4,3
Jää	2,2
Ilma	1
Kivilajit	0,9

Tilavuuslämpömäärä kuvaa sitä lämpömäärää, joka tarvitaan muuttamaan tietyn aineen lämpötilaa yksikön verran tilavuusyksikköä kohti (Kersten 1952). Tilavuuslämpökapasiteetti voidaan määrittää tiheyden ja ominaislämmön tulona kaavan 9 mukaisesti.

$$c_v = c \rho \quad (9)$$

jossa	c_v	on tilavuuslämpökapasiteetti, [J/m ³ K]
	c	on ominaislämpö, [J/kgK]
	ρ	on tiheys, [kg/m ³]

Maan tilavuuslämpökapasiteetti lasketaan kaavoilla 10 ja 11 (Andersland & Andersson 1978).

$$c_{vu} = \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(0,18 + 1,0 \frac{w}{100} \right) c_{wv} \quad (10)$$

$$c_{vf} = \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(0,18 + 0,5 \frac{w}{100} \right) c_{wv} \quad (11)$$

jossa	c_{vu}	on sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, [J/m ³ K]
-------	----------	---

c_{vf}	on jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, [J/m ³ K]
c_{wv}	on veden tilavuuslämpökapasiteetti, [J/m ³ K]

Jos maa ei ole täysin sula tai jäässä, ominaislämpö voidaan määrittää kaavan 12 mukaisesti (Andersland & Andersson 1978).

$$c_T = x_s c_s + x_w c_w + x_i c_i \quad (12)$$

jossa	c_t	on ominaislämpö lämpötilassa T, [J/kgK]
	x_s	on maa-aineksen suhteellinen osuus
	c_s	on maan ominaislämpö, [J/kgK]
	x_w	on veden suhteellinen osuus
	c_w	on veden ominaislämpö, [J/kgK]
	x_i	on jään suhteellinen osuus
	c_i	on jään ominaislämpö, [J/kgK]

2.4.4 Olomuodonmuutoslämpö

Olomuodonmuutoslämmöllä, tarkemmin maan jäätymis- ja sulamislämmöllä, tarkoitetaan maan jäätyessä vapautuvaa ja sulaessa sitoutuvaa lämpömäärää. Tilaa kuvaa kaava 13 (Helander 1986).

$$L_s = \frac{w-w_u}{100} \rho_d L_w \quad (13)$$

jossa	L_s	on maan jäätyislämpö, [J/m ³]
	w	on maan vesipitoisuus, [%]
	w_u	on jäätyvätön vesipitoisuus, [%]
	ρ_d	on kuivatiheys, [kg/m ³]
	L_w	on veden jäätyislämpö, [J/kg]

2.5 Maan routaantuminen ja roudan syvyyden arviointimenetelmät

2.5.1 Yleistä

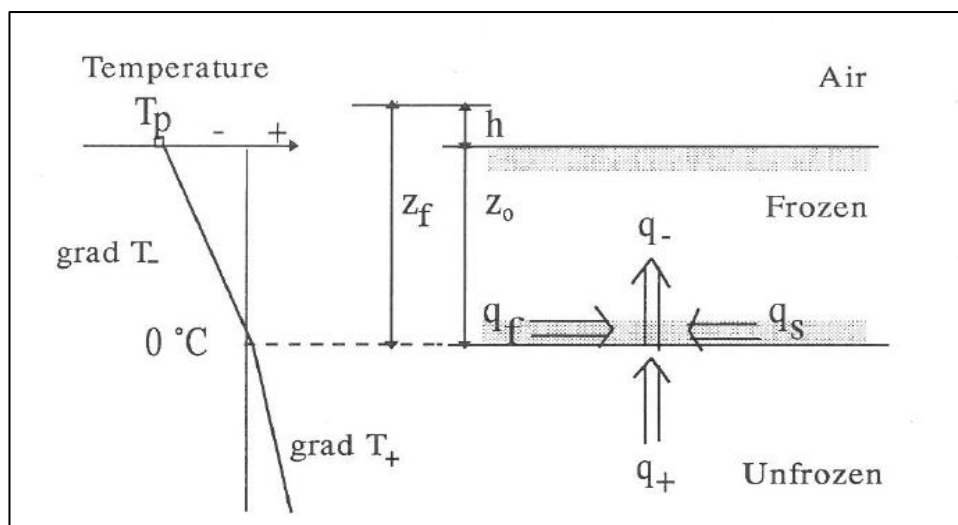
Roudan syvyyteen vaikuttavat useat eri ominaisuudet ja tekijät. Ensinnäkin, maalajin ominaisuuksista erityisesti lämmönjohtavuudella, tilavuuslämpökapasiteetilla, vesipitoisuudella ja routivuudella on selvä korrelaatio roudan syvyyteen. Toiseksi, ilmaston ominaisuuksista roudan syvyyteen vaikuttavat pakkasmäärä ja vuoden keskilämpötila. Lisäksi, maan pintakasvillisuudella, topografialla, lumikerroksen paksuudella ja pohjaveden pinnansyvyydellä on havaittu olevan vaikutusta roudan esiintymissyvyyteen. (VTT 2007.)

Määrävinä ominaisuuksina roudan tunkeutumissyvyyttä arvioitaessa pidetään maalajin vesipitoisuutta ja lämmönjohtavuutta jäätyneessä tilassa. Routiminen pienentää roudan syvyyden kasvua, koska jäätyneen maan läpäisevä lämpöhäviövirtaus korvautuu routarajalla jäätyislämmöllä. Jäätyislämpö on huokosveden jäätyksen ja routimisen tuot-

taman jäätyislämmön summa, jonka yhtälö on esitetty kaavassa 14. (Saarelainen 1992.) Kuvassa 2.5 on havainnollistettu lämpötasapainoa maan sisällä.

$$q_- = q_+ + q_f + q_s + q_c \quad (14)$$

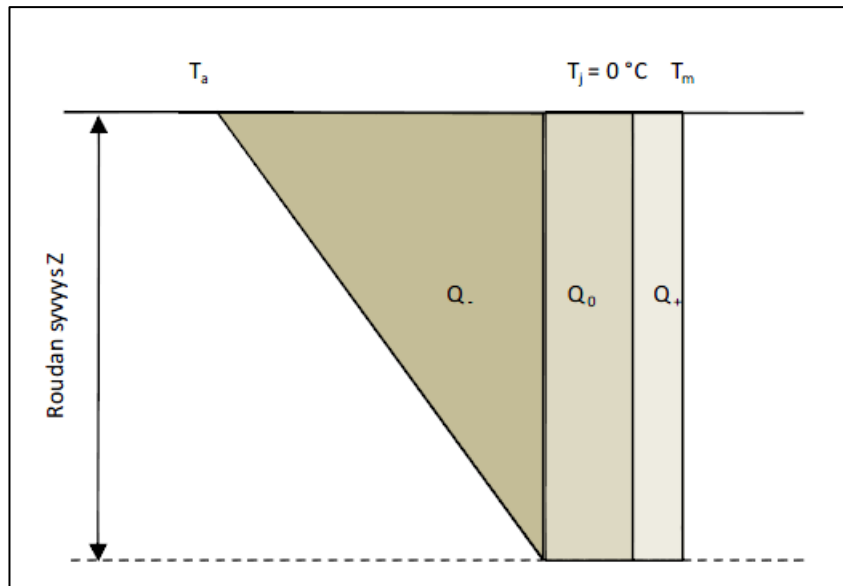
jossa	q_-	on lämmön virtaus kerroksen läpi
	q_+	on lämmön virtaus jäätymisrajalle sulasta maasta
	q_f	on lämmön virtaus, joka syntyy routarajalla olevan huokosveden jäätyessä
	q_s	on lämmön virtaus, joka syntyy routarajalle virtaavan huokosveden jäätyessä
	q_c	on lämmön virtaus, joka syntyy jäätyneen kerroksen jäähtyessä



Kuva 2.5. Lämpötasapaino maan sisällä (Saarelainen 1992).

2.5.2 Roudan syvyyden laskennallinen arvio

Yleisimmin roudan syvyyttä on laskennallisesti arvioitu Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin (1938) esittämällä lämpötilajakautuman mallilla. Roudan ollessa syvyydellä Z ajassa t on lämpötilakenttä kuvan 2.6 mukainen. (RIL 261 2013)



Kuva 2.6. Lämpötilan jakautuminen maan jäätyessä (VTT 2007).

Kuvassa 2.6 oikeassa laidassa Q_+ edustaa maan jäähtymislämpöä maan jäähtyessä lähtöhetken lämpötilasta T_m (vuoden keskilämpötila) 0 °C :een. Kuvassa keskellä sijaitseva suorakaide kuvastaa maassa olevan veden jäähtymislämpöä Q_0 ja vasemmanpuoleinen kolmio esittää rakenteen jäähtymislämpöä Q_- , kun maan pintalämpötila laskee 0 °C :sta T_a :aan. T_a on pakkaskauden ilman keskilämpötila. (Watzinger, Kindem & Michelsen 1938.)

Edellä kuvatut lämpömäärät Q_+ , Q_- ja Q_0 voidaan esittää kaavoilla 15,16 ja 17 (VTT 2007).

$$Q_+ = C_u T_m Z \quad (15)$$

$$Q_0 = \rho_d I Z w \quad (16)$$

$$Q_- = C_f |T_c| 0,5 Z \quad (17)$$

jossa	Z	on roudan syvyys, [m]
	C_u	on tilavuuslämpökapasiteetti sulana, [$\text{Wh}/\text{m}^3\text{K}$]
	C_f	on tilavuuslämpökapasiteetti jäätyneenä, [$\text{Wh}/\text{m}^3\text{K}$]
	T_m	on vuoden keskilämpötila, [$^{\circ}\text{C}$]
	T_c	on pakkaskauden keskilämpötila, [$^{\circ}\text{C}$]
	w	on vesipitoisuus, [%]
	ρ_d	on maan kuivairtitiheys, [kg/m^3]
	I	on veden jäähtymislämpö, 93 Wh/kg

Jäätyneen ja sulan maan tilavuuslämpökapasiteettien laskenta on esitetty aiemmin kapaleessa 2.4.3.

Näin ollen, kun routa on saavuttanut syvyyden Z , jäätyneestä maasta vapautunut lämpömäärä on kaavan 18 muotoa (VTT 2007).

$$qZ = Q = Q_0 + Q_- + Q_+ \quad (18)$$

Kaavojen 15,16 ja 17 avulla

$$q = C_u T_m + w \rho_d I + 0,5 C_f |T_c| \quad (19)$$

Aikayksikössä vapautuneelle lämpömäärälle saadaan

$$dQ = q dZ = \frac{\lambda}{Z} (T_i - T_c) dt \quad (20)$$

ja edelleen integroimalla

$$Z = \sqrt{\frac{2\lambda |T_c| t}{q}} \text{ ja edelleen } Z = \sqrt{\frac{2\lambda F}{q}} \quad (21a)$$

$$\text{kun } |T_c| * t = F \text{ (pakkasmäärä, Kh)}$$

$$\text{kun } k = \sqrt{\left(\frac{2\lambda}{q}\right)}$$

$$Z = k\sqrt{F} \quad (21b)$$

Roudan syvyyden laskennallista arviointikaavaa voidaan soveltaa myös roudan syvyyden laskemiseen kerroksellisessa rakenteessa käyttämällä osittaispakkasmäärän menetelmää. (RIL 261 2013.) Kerrokseen jäätymiseen vaadittava pakkasmäärä määritetään erikseen kaavasta 22.

$$F_n = q_n d_n \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \right) \quad (22)$$

jossa	d_n	on kerroksen paksuus, [m]
	n	on kerroksen järjestysnumero
	$\lambda_{1...n}$	on kerroksen lämmönjohtavuus, [W/mK]

Tästä saadaan n:n kerroksen jäädymiseen käytettävissä oleva pakkasmäärä kaavan 23 mukaisesti.

$$F_n = F - \sum_{k=1}^{n-1} F_k \text{ ja edelleen}$$

$$d_n = -\lambda_n \sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} + \sqrt{\left(\lambda_n^2 \left(\sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} \right)^2 + \frac{2\lambda_n}{q_n} F_n \right)} \quad (23)$$

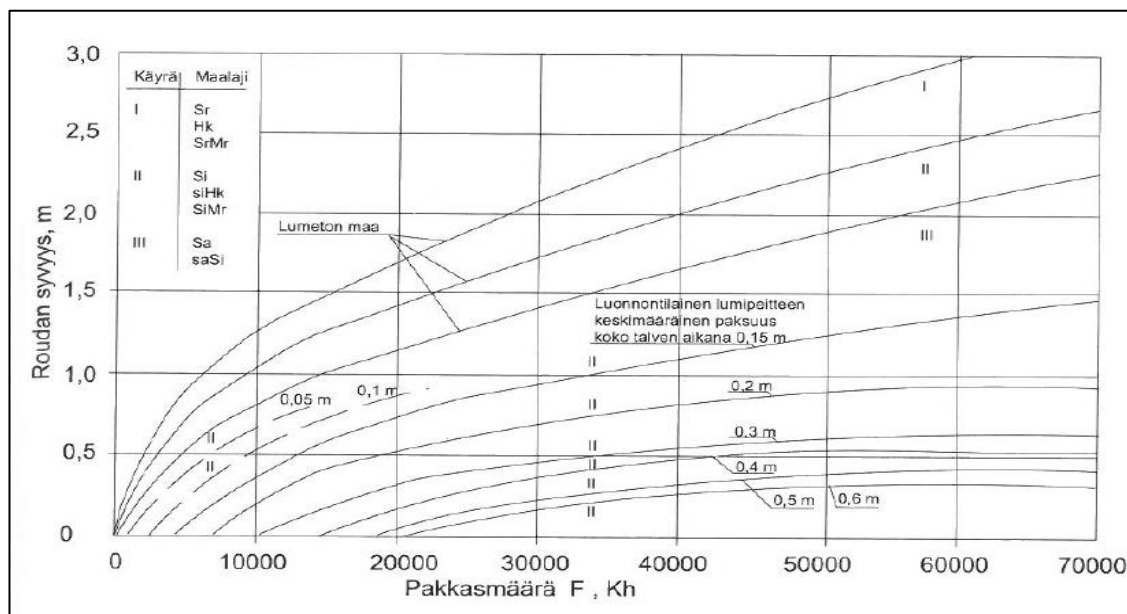
Roudan kokonaissyvyys lasketaan kerroksittain vähentämällä kokonaispakkasmäärästä aina laskettavan kerroksen jäätymiseen vaadittava pakkasmäärä. Tilanteessa, jossa koko kerros ei ”käytettävällä” pakkasmäärällä jäädy lasketaan kerroksen roudan syvyys ja lisätään se aiempiin kerrospaksuuksiin. Roudan kokonaissyvyys on siis kaavan 24 mukainen.

$$d_{kok} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n \quad (24)$$

jossa d_n on määritelty aiemmin
 $d_{1...n}$ on maalajin kerrospaksuus, [m]

2.5.3 Roudan syvyyden likimääräinen arvio

Roudan syvyyttä voidaan arvioida melko tarkasti tunnettaessa pakkasmäärä ja maalaji. Lisäksi, lumipeitteellä on vaikutusta roudan tunkeutumissyvyyteen. Edellä mainittua on havainnollistettu kuvassa 2.7. Kun silttimaalajia pidetään peruslähtökohtana, voidaan roudan syvyys muissa maalajeissa määrittää muuntokertoimilla, jotka ovat esitetty taulukossa 2.8. (VTT 2007.)



Kuva 2.7. Lumen, pakkasmäärän ja maalajin vaikutus roudan tunkeutumissyvyyteen (Soveri & Varjo 1977).

Taulukko 2.8. Maalajien muuntokertoimet (Frost i 1976).

Maalaji	Roudan syvyyden muuntokerroin
Louhe*	1,5
Hiekka, sora ja moreeni	1,15
Siltti	1
Savi	0,85
Turve	0,6

* Roudan syvyyttä mallinnetaan normaalisti otaksumalla, että lämpö virtaa maassa johtumalla. Tämä on totta täysin tai lähes veden kyllästämässä maassa. Kuivatetussa louheessa on selvästi havaittu, että jäähtymistä tapahtuu myös tuulettumalla

Roudan syvyyden arvioinnin empiiriset menetelmät ovat tapauskohtaisia. Menetelmät on sidottu tarkastelutilanteen mukaisiin ympäristö- ja pohjaolosuhteisiin, jossa ne ovat kehitettykin. Tästä syystä voidaan arvioida, että menetelmillä ei ole yleispätevää luonnetta. Suomessa yleisimmin käytössä oleva roudan syvyyden arviointikaava ottaa huomioon pakkasmäärän ja maalajista riippuvan routaantumiskertoimen k . (Kujala 1994.)

Roudan syvyyttä lumettomassa maarakenteessa arvioidaan likimääräiskaavalla (vrt. kaava 21b) kaavan 25 mukaan (Stefan 1891).

$$Z = k\sqrt{F} \quad (25)$$

jossa	Z	on roudan syvyys maan pinnasta, [mm]
	F	on pakkasmäärä talven alusta lukien, [Kh]
	k	on routaantumiskerroin, [mm * (Kh) ^{0.5}]

2.6 Routanousu

2.6.1 Routimisilmiö

Maan jäätyminen seurauksena tapahtuva routanousu on tulosta monimutkaisesta vuoro-vaikutussuhteesta massan- ja lämpötilan välillä. Merkittävimmät tekijät routanousu tarkastelun yhteydessä ovat (ISSMFE 1989b)

- maalajin ominaisuudet (rakeisuus, savipitoisuus ym...)
- veden kulkeutuminen jäätymisrintamalle
- lämpötilat
- jännitystila.

Veden kulkeutuminen ja lämpövirtaukset saavat aikaan monimutkaisen fysikaalisen routimisilmiön. Makroskooppisesti ilmiö tunnetaan veden keräytymisenä jäätymisrintamassa linssimäisiin muodostumiin. Ilmiössä vesi jäätyy puhtaana ja työntää maata tieltään. Maa alkaa jäätyä huokosveden lämpötilan laskiessa alle veden jäätyispisteen (oletuksena 0-astetta) ja jäätyessään huokosveden tilavuus kasvaa noin 9 %. Kyllästyneen ja jäätyneen maan tilavuuden kasvu on siis verrannollinen jäätyvän huokosveden määrään. (Saarelainen 1992.)

Ilmiön selittäminen mikroskooppisesti on osoittautunut monimutkaiseksi. Ilmiöiden kaikkia yksityiskohtia ei ole tähänkään päivään mennessä selvitetty täysin kiistattomasti. (Aittomäki 1986.) Pääpiirteissään tapahtuma tunnetaan ja sitä on selitetty erilaisilla routanousuteorioilla.

Tässä työssä on sovellettu Konrad & Morgensternin (1980) teoriaa routanousulle, mutta routivuuden määrällisenä arviointiperusteena käytetään segregatiopotentiaalin sijaista routanousukerrointa.

2.6.2 Segregaatiopotentiaali-teoria

2.6.2.1 Vesi jäätyvässä maassa

Jäätynyt maa koostuu kiinteistä aineista, nesteistä ja kaasuista. Pääosin materian muodostavat kiinteät mineraalipartikkelit, jää, sitoutumaton ja nestemäinen vesi sekä kaasut. Tutkimukset ovat osoittaneet, että maassa oleva vesi ei jäädy täysin 0°C :n lämpötilassa, vaan muuttuvalla lämpötila-alueella. Huokosvesi on sitoutunut maapartikkeleihin eri tavoin ja eri voimakkuuksilla. Mitä vahvempi veden ja partikkelin sidos on, sitä hitaammin vesi jäätyy. Ensiksi jäätyy sitoutumaton vesi, jota seuraa suurissa huokosissa olevan veden jäätyminen. Lämpötilan vielä laskiessa jäätyy lujemminkin sitoutunut vesi. (Aittomäki 1986.) Huokosveden jäätymiseen vaikuttavat lisäksi maassa olevat epäpuhtaudet ja maahan kohdistuvat jännitykset (Koskinen 1998). Maa-aineksen jäätyvätön veden ja lämpötilan riippuvuutta on havainnollistettu aiemmin kuvassa 2.4.

Routimisen kannalta erityisen tärkeässä asemassa on hienorakeisten maapartikkelien määrä, niihin sitoutunut vesi ja maa-aineksen kyllästymisaste. Riippuen maalajista jäätyvätön veden määrä vaihtelee huomattavasti. -10°C :ssa savissa voi esiintyä huomattavia määriä jäätyvätöntä vettä, kun taas silteissä suurin osa huokosvedestä jäätyy heti lämpötilan laskiessa hieman alle nollan asteen. (Konrad & Morgenstern 1980.)

Kuten edellä on todettu, jäätyneessä maassa on nestemäistä vettä, jolloin maa on osittain vedellä kyllästynyt. Tämä on johtanut oletukseen niin sanotusta osittain jäätyneestä kerroksesta (frozen fringe). Osittain jäätynyt kerros on vettä läpäisevä ja näin ollen säätelee veden virtausta jäälinsseen. Jäätyvätönä pysyvän vesikerroksen vaikutus routimistahtumiin on yleisesti hyväksytty. (Kujala 1994.)

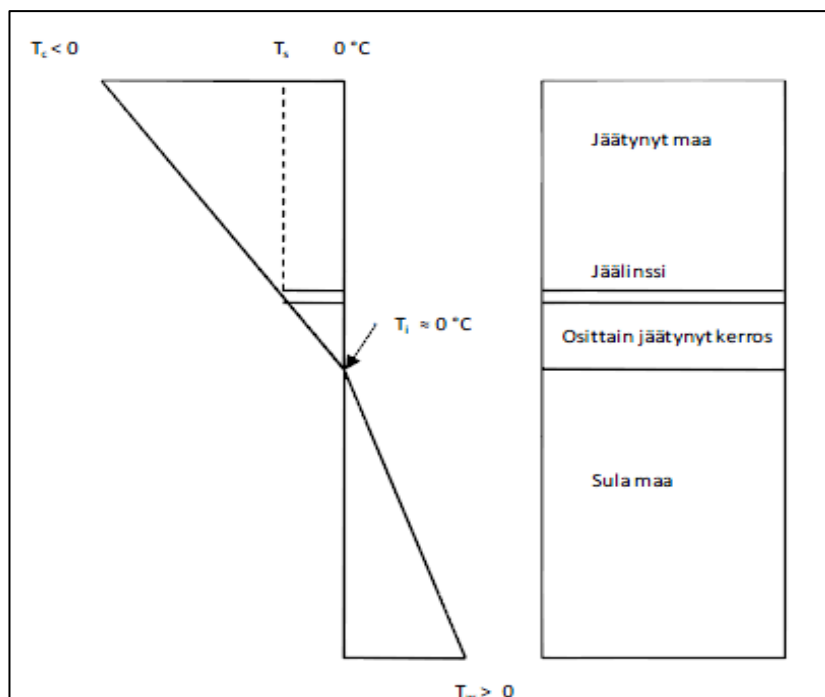
2.6.2.2 Maan lämpötilaolosuhteet

Lämpötilaolosuhteita jäälinsin muodostumisen yhteydessä on esitetty kuvassa 2.8. Kuvassa T_s esittää lämpötilaa kasvavan jäälinsin pohjassa ja T_i lämpötilaa, jossa maan huokosiin voi vielä teoriassa muodostua jäätä. Riippumatta maalajista osittain jäätynyt maakerros sijaitsee aina isotermien T_s ja T_i välissä. (Konrad & Morgenstern 1980.)

Laboratoriossa suoritettujen routanousukokeiden perusteella on havaittu, että (Konrad & Morgenstern 1980)

- kokeessa muodostunut jäälinssi on kasvanut koko maanäytteen poikkipinta-alan kokoiseksi
- jäälinssi pysäyttää veden kulkeutumisen pidemmälle jäätyneeseen maakerrokseen
- veden virtaus yli osittain jäätyneen maakerroksen on jatkuvaa.

Lisäksi, kokeissa on havaittu, että jäälinsin paksuudella ja routarajalle virranneella veden määrällä on voimakas korrelaationsuhde.



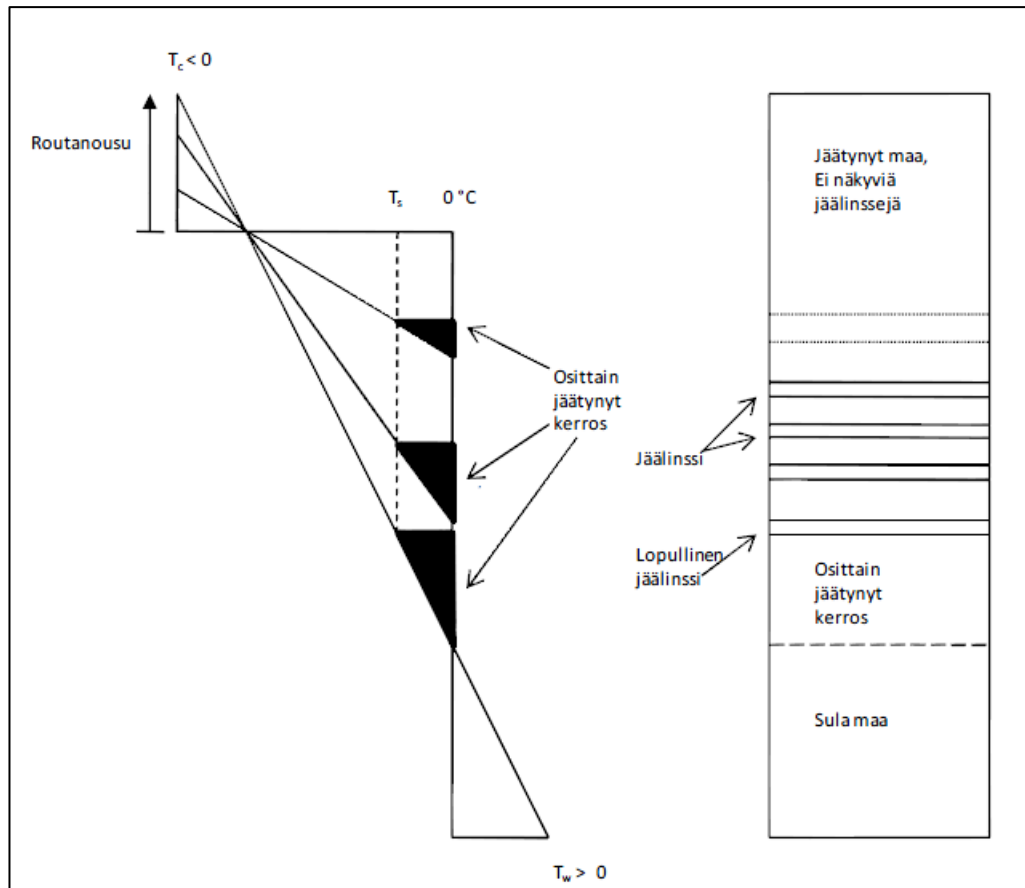
Kuva 2.8. Lämpötilat maan jäätyessä (Konrad & Morgenstern 1980).

Jäätyvän maanäytteen voi karkeasti jakaa passiiviseen ja aktiiviseen osaan. Kuvassa 7. passiivinen osa koostuu jäätyneestä maasta tilojen T_c ja T_s välillä. Aktiivinen osa koostuu osittain jäätyneestä maasta ja sulasta maakerroksesta. Passiivisen osan kosteuden virtaus jäälinsseen on vähäistä johtuen jäätyneen maan alhaisesta vedenläpäisevyydestä. Samalla passiivisen osan vaikutus kokonaisroutanousuun on havaittu olevan häviävän pieni sekä laboratoriotutkimuksissa että kenttähavaintojen perusteella. (Konrad & Morgenstern 1980.)

2.6.2.3 Jäälinsin muodostuminen

Jäätymisen alussa routarintaman eteneminen on voimakasta ja veden kulkeutuminen routarintamaan määräytyy paikallisen vedenläpäisevyyden perusteella. Tämä ilmiö vahvistaa paikallisesti osittain jäätymättömiä ohuita vesikerroksia, jotka ympäröivät maapartikkeleita. Tämän seurauksena systeemin lämpötasapaino väliaikaisesti horjuu, jolloin tasapainottavana reaktiona osa vedestä jäätyy. Täten maapartikkeleita ympäröivän vesikerroksen paksuus pysyy tietyssä lämpötilassa vakiona sinne virtaavan uuden veden jäätymisen seurauksena. Jäälinsin muodostumisilmiötä on esitetty kuvassa 2.9. (Konrad & Morgenstern 1980.)

Routarintaman edetessä sekä routanousu että huokosjäämatriisiin kohdistuvat rasitukset ovat pieniä. Routan tunkeutumisen hidastuessa myös lämpötilagradientti pienenee. Tällöin veden kerääntyminen tiettyyn pisteeseen näytteessä on mahdollista. Vedenpaineen voimistuessa huokosjää rikkoutuu ja jäätymisen seurauksena paikallisesti keräytynyt vesikerros synnyttää erillisen jäälinsin. Maanäytteeseen muodostuu useampia linsejä routarintaman tunkeutuessa syvemmälle. (Konrad & Morgenstern 1980.)



Kuva 2.9. Jäälinssin muodostumista maarakenteeseen (Konrad & Morgenstern 1980).

Kuvassa 2.9 esitetyn prosessin alussa, routarintaman nopean etenemisen aikana ei näytteenä synny silmin havaittavia jäälinssiä. Routarintaman etenemisnopeuden hidastuessa näytteenä muodostuu ohuita jäälinssiä ja niiden pystysuuntainen etäisyys toisistaan on pieni johtuen alueen suuresta lämpötilagradientista. Ilmiön edetessä roudan tunkeutumisnopeus ja lämpötilagradientti pienenee, jolloin osittain jäätyneen kerroksen paksuus kasvaa. Tästä seuraa, että jäälinssit kasvavat paksummiksi ja sijaitsevat etäämmällä toisistaan. Osittain jäätynyt kerros saavuttaa maksimipaksuuden routarintaman etenemisen pysähtyessä. Jäälinssin muodostumismekanismin viimeiseksi vaiheeksi kutsutaan stabiiliksi tilaksi (steady state). Tilassa maa-aineksen lämpötilaprofiilissa ei enää tapahdu muutoksia. (Konrad & Morgenstern 1980.)

3 Routanouskoe – mitattavat suureet ja koelaitteisto

3.1 Määritelmät ja mitattavat suureet

3.1.1 Määritelmiä ja kaavoja

Routanousu kokeen aikana mitataan ja lasketaan useita suureita, kokeista riippuen vaihtuvien väliajoin. Tärkeitä käsitteitä ja määritelmiä routanousukokeissa ovat muun muassa (Onninen 2001b, Saarelainen 1992)

1. **Routanousu (h)** on näytteen korkeuden muutos kokeen aikana. Se voidaan laskea kokeessa alkuajankohdan korkeuden ja ajanhetken korkeuden erotuksena.
2. **Sulan näytteenosan korkeus (Z_s)** lasketaan näytteen eri korkeusasemien lämpötiloja interpoloimalla.
3. **Roudan syvyys (Z_j)** määritetään yhtäläillä lämpötila-antureiden avulla. Roudan syvyys on alkukorkeuden ja routanousun summa vähennettynä sulan näytteen korkeus. [mm]

$$Z_j = H + h - Z_s \quad (26)$$

jossa H on näytteen alkukorkeus, [mm]
 Z_s on sulan näytteenosa korkeus, [mm]
 h on routanousu, [mm]

4. **Routanoususuhde eli suhteellinen routanousu (h/Z_j)** on routanousun ja roudan syvyyden suhde. [%]
5. **Routanousunopeus ($\Delta h/\Delta t$)** on mittausjaksolle määritettävä routanopeus. [mm/vrk]

$$v = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (27)$$

jossa v on routanousunopeus
 Δh on routanousun muutos mittausvälillä, [mm]
 Δt on mittausväli, [h]

6. **Lämpötilagradientti (gradT)** on routarajan ja jäätyneen näytteen pinnan välisen lämpötilaeron suhde jäätyneen kerroksen paksuuteen. [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$]

$$\text{gradT} = 1000 \left(\frac{0 - T_{\text{kansi}}}{Z_j} \right) \quad (28)$$

jossa T_{kansi} on kannen/näytteen pinnan lämpötila, [$^{\circ}\text{C}$]
 Z_j on roudan syvyys (jäätyneen näyteosan korkeus), [mm]

7. **Routanouskerroin (SP)** on routanousunopeuden ja jäätyneen kerroksen lämpötilagradientin suhde. [mm^2/Kh]

Tämän lisäksi routanousukokeissa näytteistä määritetään vesipitoisuus, märkätilavuuspaino ja kuivatilavuuspaino kaavojen 29, 30 ja 31 mukaisesti.

$$w = 100 \frac{B_m - B_k}{B_k - B} \quad (29)$$

$$\gamma = ((B_m - B)g10^3)/V \quad (30)$$

$$\gamma_d = \gamma / (1 + \frac{w}{100}) \quad (31)$$

jossa	w	on vesipitoisuus, [%]
	B _m	on astia+näyte märkänä, [kg]
	B _k	on astia+näyte kuivana, [kg]
	B	on astian massa, [kg]
	V	on näytteen tilavuus, [m ³]
	γ	on märkätilavuuspaino, [kN/m ³]
	γ _d	on kuivatilavuuspaino, [kN/m ³]
	g	on maan putoamiskiihtyvyys, 9,807; [m/s ²]

3.1.2 Segregaatiopotentiaali ja routanousukerroin

Maaperän routivuutta on yritetty selittää monilla eri teorioilla ja malleilla, mutta usein ilmiön selittämiseen käytetyt mallit ovat olleet puutteellisia. Keskeisin lähtökohta tutkiessa routanousuilmiötä on veden kulkeutuminen jäätyvään kerrokseen. Yleisimmin käytössä olleeksi ja hallitsevaksi teoriaksi on noussut Konrad ja Morgensternin vuonna 1980 kehittämä segregaatiopotentiaali-teoria (Saarelainen 1986). Teorian perusolettamuksena pidetään sitä, että veden virtauksella jäälinssiin ja osittain jäätyneen maakerroksen lämpötilagradientilla on kaavan 32 mukainen yhteys. Kerroin SP(t) kuvaa maalaajin taipumusta routimiseen. (Konrad & Morgenstern 1981.)

$$v_w = SP(t)gradT_f(t) \quad (32)$$

jossa	v _w	on veden virtausnopeus jäälinssiin, [m/h]
	SP(t)	on segregaatiopotentiaali, [m ² /Kh]
	gradT _f (t)	on osittain jäätyneen kerroksen lämpötilagradientti, [K/m]

Segregaatiopotentiaalin täsmällinen määrittäminen on mahdollista laboratorio-olosuhteissa, kun käytössä on tarkka lämpötilojen mittausjärjestelmä (Friberg & Slunga 1989). Maanäytteeseen kulkeutuva vesi jäätyessään muodostaa huokosjäää tai jäälinssirakennetta. Yksidimensiainen tilavuudenmuutoksen nopeus jäätyvässä ja vedellä kyllästyneessä maassa voidaan esittää kaavan 33 mukaisesti. (Pesu 2010.)

$$h(t) = (\frac{\rho_w}{\rho_i})v_w = 1,09v_w \quad (33)$$

jossa	h(t)	on routanousunopeus, [m/h]
-------	------	----------------------------

ρ_w	on veden tiheys, [kg/m ³]
ρ_i	on jään tiheys, [kg/m ³]
v_w	on veden virtausnopeus jäälinsseen, [m/h]

Yhdistämällä kaavat 32 ja 33 saadaan *segregaatiopotentiaalille*

$$SP(t) = \frac{1}{1,09} \frac{h(t)}{\text{grad}T_f(t)} \quad (34)$$

Suomessa yleisimmin routanousun kuvaamiseen käytetään **routanousukerrointa** (Saarelainen 1992). Routanousukertoimella (frost heave coefficient) tarkoitetaan systeemissä tapahtuvan routanousunopeuden ja routarajalla vaikuttavan lämpötilagradientin suhdetta. Routanousukerroin (SP) kuvaa routanousun voimakkuutta eikä vain ainoastaan luokittele maa-ainesta routimattomaan tai routivaan luokkaan. Routamitoituksen kannalta on kriittistä tuntea roudan voimakkuus ja määrä. (Saarelainen 2001.)

Routanousukertoimen ja segregatiopotentiaalin pääasiallinen ero on siinä, että routanousukerroin huomioi veden jäätyneen aiheuttaman 9% tilavuuden kasvun. Veden virtausnopeuteen perustuva segregatiopotentiaali-teoria ei tätä huomioi. Lisäksi, routanousukerroin-mallissa lämpötilagradientti määritetään koko jäätyneestä alueesta, kun vastaavasti segregatiopotentiaali-teorian mukaan lämpötilagradientti määritetään osittain jäätyneestä alueesta. (Nurmikolu 2005.) Routanousukerroin (SP_0) voidaan esittää kaavan 35 mukaisesti.

$$SP_0 = \frac{v}{\text{grad}T} = \frac{\Delta h Z_j}{\Delta t (0 - T_-)} \quad (35)$$

jossa	SP_0	on routanousukerroin, [mm ² /Kh] (alaindeksi 0-kuorma)
	Δh	on routanousun muutos mittausvälillä, [mm]
	Δt	on mittauksen aikaväli tunteina, [h]
	T_-	on pinnan lämpötila, [K]
	Z_j	on roudan syvyys, jäätyneessä näytteessä, [mm]
	v	on routanousunopeus, [mm/h]
	$\text{grad}T$	on jäätyneen kerroksen lämpötilagradientti, [K/mm]

Routanousukerroin soveltuu segregatiopotentiaali-menetelmää paremmin maastoon, koska lämpötilagradientti voidaan määrittää tarkemmin maan pinnan lämpötilan ja roudan syvyyden mukaan. Routanousukertoimen ja vallitsevan jännityksen välille on tutkimuksissa havaittu korrelaationsuhde. Suoritetuissa kokeissa routanousukertoimet on määritetty SP_x alaindeksillä, jossa x kuvastaa vallitsevaa jännitystilaa. Tutkimuksissa nollakuormaa (SP_0 -tilanne) edustaa ainoastaan välttämättömät koelaitteiston osakuormat, jotka ovat suuruudeltaan 2,4 kPa. (Pesu 2010.)

3.2 Koelaitteisto

3.2.1 Yleistä

Tässä työssä käytetyn routasellin suunnittelun ja rakentamisen toteutti diplomi-insinööri Jarmo Pesu (2010) ja laboratorioteknikko Matti Ristimäki Aalto-yliopiston georakentamisen osastolta. Toteutusprosessiin osallistui myös yliopisto-opettaja Henry Gustavsson

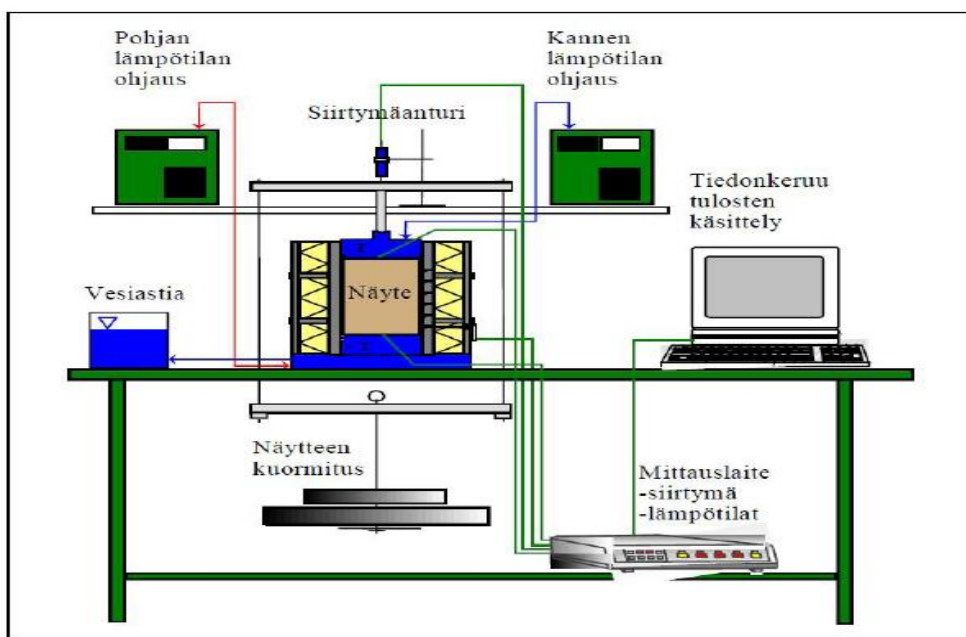
Aalto-yliopistosta. Laitteen toteutukseen liittyvää konsultaatiota saatiin erityisesti Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) ja Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) tahoilta.

Routanousukokeet suoritettiin säähuoneessa. Säähuoneen lämpötilaksi säädettiin kokeiden ajaksi $+2^{\circ}\text{C}$. Kokeen aikana lämpötilat vaihtelivat säädetyistä $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Näin voidaan katsoa, että routanousukerroin määritettiin vakiolämpötilakokeella.

3.2.2 Routaselli

Menetelmäkuvauksen (Onninen 2001b) mukaisesti routanousukokeen suorittamista varten tarvittiin kuvassa 3.1 esitetyt laitteet (Saarelainen 1992, Koskinen 1998)

- Säähuone, jossa lämmönvaihtelut säädettiin välille $+1 - 3^{\circ}\text{C}$.
- Kaksi jäähdytyslaitteistoa, jossa oli pakkasnesteenkiertojärjestelmä. Neste johdettiin sekä kansi- että pohjaelementtiin.
- Kansielementti, jonka alapinnassa oli lämpötila-anturi. Kansielementissä kiersi jäädytyksen aikana -3°C -asteinen neste.
- Pohjaelementti, jonka yläpinnassa oli lämpötila-anturi ja jossa kiersi $+1^{\circ}\text{C}$ -asteista nestettä jäädytyksen aikana.
- Routaselli
- Vesiastia, jossa vedenpinta kokeen aikana pidettiin 5-10 mm sellin pohjan yläpuolella.
- Kuormituskehikko
- Mittauslaitteisto:
 - lämpötila-anturit
 - siirtymäanturit ja mittakello
 - tiedonkeruujärjestelmä



Kuva 3.1. Routanousukokeen periaatteellinen järjestely (Koskinen 1998).

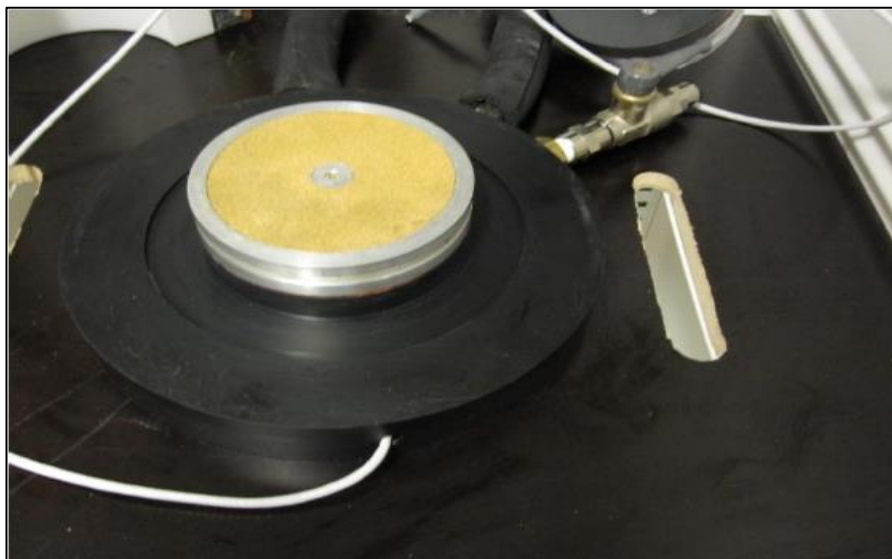
Routasellissä **kansielementti** toimi mätänä, joka liikkui routanousun ja sulamis-painuman mukana. Näytteen lämpötilaan vaikutettiin kierrättämällä halutun lämpöistä nestettä männässä. Jäädytyksessä pakkasnesteen lämpötilana käytettiin -3°C astetta, kun

taas sulamisprosessin aikana lämpötila oli $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kansielementti koostui alumiini- ja PVC-osasta ja kannen halkaisija oli 99 mm. Kansielementin massa oli 1100 grammaa. Alumiiniosassa oli huokoskiven kautta kosketuksissa näytteeseen. Alumiiniosassa oli jyrsimällä tehty kanava nestekiertoa varten sekä poraamalla valmistetut läpiviennit lämpötila-antureille ja nesteensyötölle. Lisäksi osassa oli urat O-renkaalle ja huokoskivelle. Kansielementti on esitelty kuvassa 3.2.



Kuva 3.2. Kansielementti.

Myös kuvassa 3.3 esitetty routasellin **pohjaelementti** oli rakennettu alumiini- ja PVC-osasta. Näytteen lämpötilaan voitiin vaikuttaa kuten kansielementinkin osalta. Näytteen jäädytyksen aikana pohjaelementin lämpötila oli $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja sulatuksessa vastaavasti $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. PVC-osassa oli urat nestekierrolle, kyllästysvedelle sekä kiinnitysruuveille.



Kuva 3.3. Pohjaelementti.

Routasellin **runkona** toimi teflonista valmistettu kaksiosainen sylinteri. Sylinterin sisähalkaisija oli 101 mm, vaipan paksuus 24,5 mm ja sellin korkeus 170 mm. Teflonsylinterin ympärillä oli 200 x 5,9 PVC- muovinen ulkokuori. Ulkokuoren ja teflonin väliin jäänyt tila oli eristetty 2-komponenttipolyuretaanilla. Sylinterissä oli 6 paikkaa lämpöti-

la-antureille. Kuvasta 3.4 havaitaan sekä routasellin runkona toimiva kaksiosainen sylinteri että pohjaelementti.



Kuva 3.4. Routasellin runko.

3.2.3 Mittauslaitteisto

Lämpötila-antureita oli routasellissä yhteensä kahdeksan kappaletta. Routasellin runkossa oli kuusi lämpötila-anturia ja pohja- ja kansielementissä kummassakin oli yksi lämpötila-anturi. Mittauksiin käytettiin RTD (Resistance Temperature Detectors) vastusantureita. PT-100 (Platinum Resistance Thermometers) anturin mitat olivat 2 x 2,3 mm ja tarkkuusluokka oli A ($\pm 0,15$ °C nollassa asteessa). Taulukossa 3.1 on esitetty antureiden nimet, malli ja sijainti.

Taulukko 3.1. Antureiden nimet, malli ja sijainti (Pesu 2010).

Nimi	Anturi	Sijainti, halkaistava selli
Kansi	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Näytteen pinnassa
Anturi 1	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 85 mm näytteen pohjasta
Anturi 2	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 70 mm näytteen pohjasta
Anturi 3	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 55 mm näytteen pohjasta
Anturi 4	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 40 mm näytteen pohjasta
Anturi 5	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 25 mm näytteen pohjasta
Anturi 6	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 10 mm näytteen pohjasta
Pohja	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Näytteen pohjassa

Siirtymämittari määrittä siirtymää jännitteen funktiona. Siirtymäanturin 1,25 V jännitys vastasi 10 mm:n siirtymää.

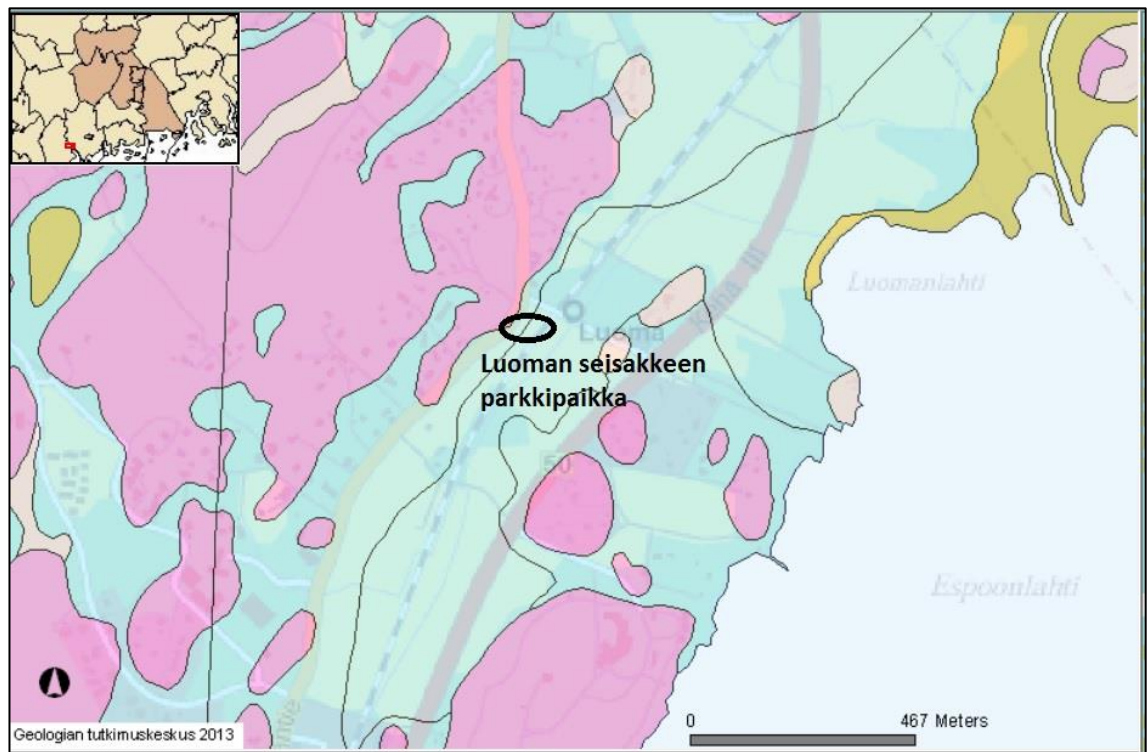
Tiedonkeruujärjestelmä koostui tietokoneesta, tiedonkeruulaitteesta ja mittausohjelmasta. Tiedonkeruulaitteena käytettiin Datatranslationin TEMPpoint 16 ch RTD Measurement Instrumentia. Laiteessa oli 16 mittauskanavaa ja se oli tarkoitettu PT-antureille. Mittauslaitteessa ei ollut vakiona tulosten esikäsittely vaihtoehtoa. Tiedonkeruulaitteen tulokset purettiin Exceliin, jossa siirtymätiedot muutettiin jännitearvoista millimetreiksi. Tiedonkeruunkontrollia tehtiin routanousukokeen pöytäkirjan avulla ja keräämällä siirtymämittakellon lukemia tasaisin väliajoin.

4 Tutkimuskohde – Luoman seisakkeen pysäköintialue

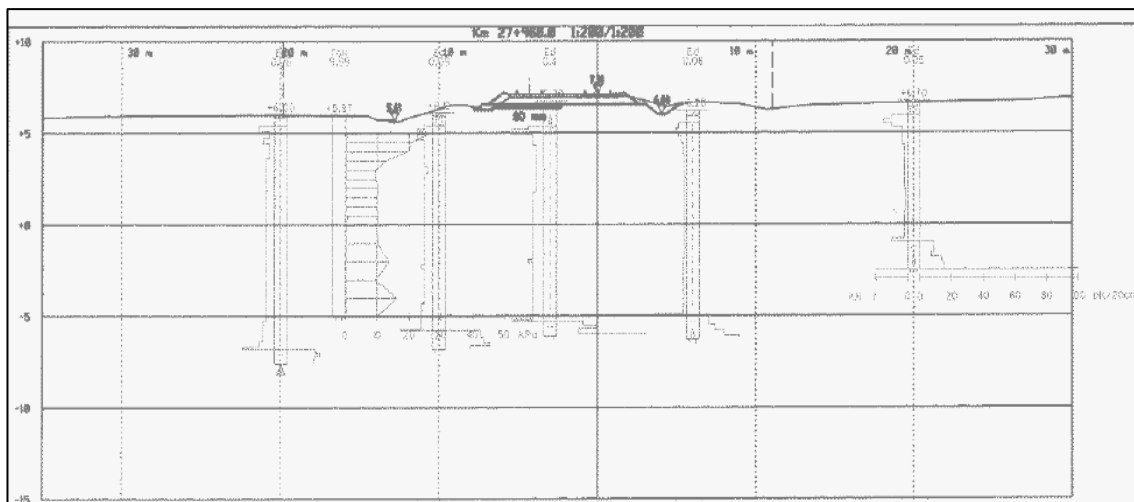
4.1 Alueen kuvaus

Luoman kylä sijaitsee Kirkkonummella, Espoon kaupungin rajalla, Espoonlahden ja Vitträsk-järven välissä. Luoteessa kylä rajoittuu Masalaan ja pohjoisessa Oitmäkeen. Luoman seisake on lähijunien pysähdyspaikka Kirkkonummella, Mankin ja Masalan seisakkeiden välissä. Koekohde jää Kehä III:n ja Masalantien väliin. Koekohteesta tehtiin havaintoja sekä maaperän ja ilman lämpötiloista että routanousun etenemisestä ja kehittymisestä.

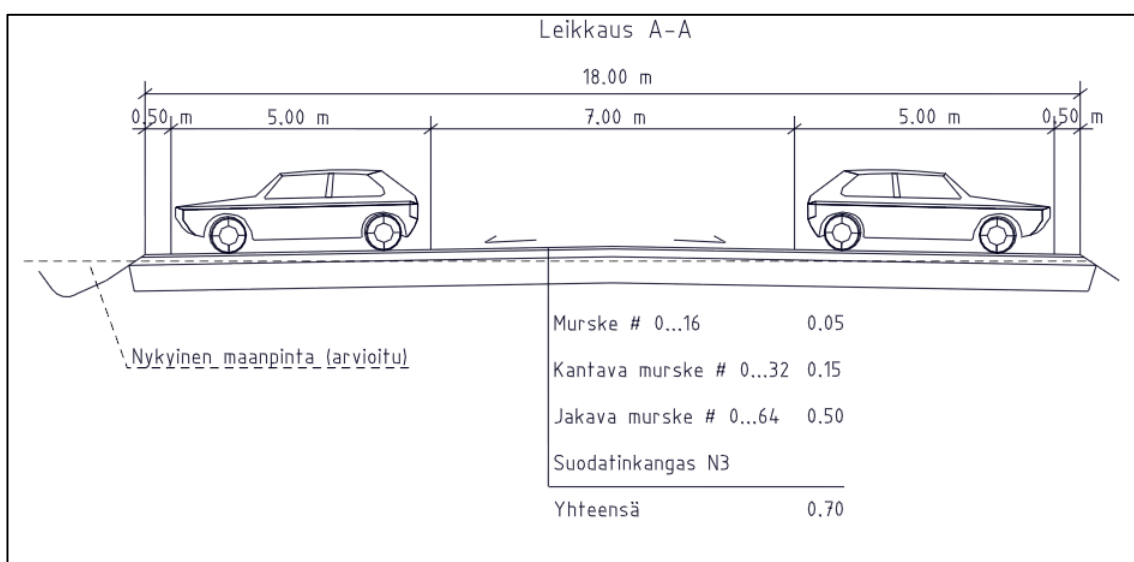
Geologian tutkimuskeskuksen pohjakartan mukaan Luoman seisakkeen välitön ympäristö on pääasiassa savimaata. Pysäköintipaikan länsi- ja pohjoispuolelle maanpinnan taso nousee ja maaperä muuttuu moreenipitoiseksi. Putkinäytteiden-oton yhteydessä havaittiin, että koekuoppaan muodostui vedenpinta läheisen ojan tasolle noin 0,6 metrin etäisyydelle maanpinnasta. Kuvassa 4.1 on esitetty koekohteen läheisen ympäristön maaperäkarta ja kuvassa 4.2 on havainnollistettu koekohteessa aiemmin tehtyjä pohjatutkimuksia ratapoikkileikkauksessa.



Kuva 4.1. Maaperäkarta, Luoma (Geologian tutkimuskeskus 2013).



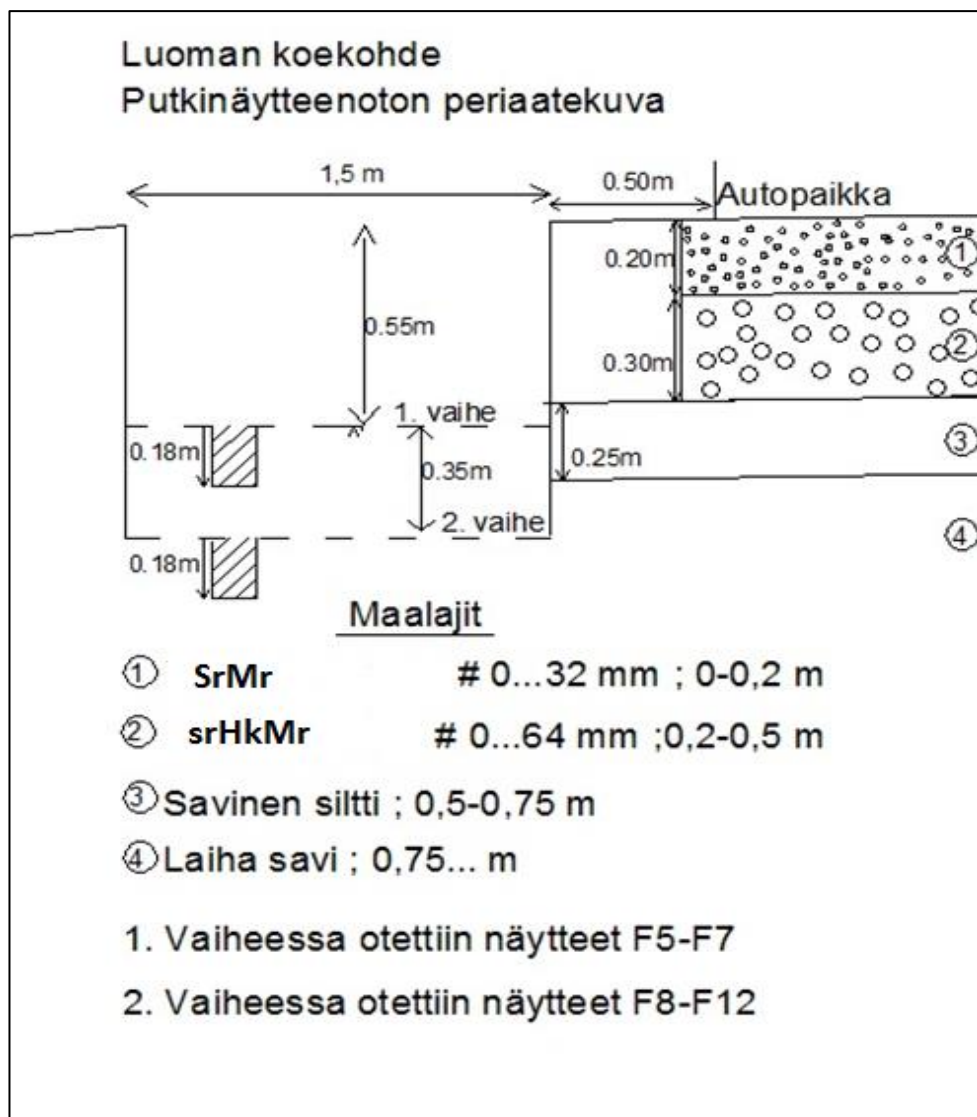
Kuva 4.2. Ratapoikkileikkaus, pysäköintialue radan oikealla puolella (VR Track Oy Georyhmä 2013).



Kuva 4.3. Koekohteen poikkileikkaus (suunnitelma: Kirkkonummen kunta, Yhdyskuntatekniikan toimiala).

Koekohteen rakennussuunnitelman mukaan pysäköintialueella on rakennekerroksia yhteensä 0,7 metriä. Ensimmäisenä kerroksena on 0,05 metrin murske (# 0...16 mm), toisena kerroksena kantavaa mursketta (# 0...32 mm) on 0,15 metrin paksuudelta. Kuvassa 4.3 esitetyn rakennussuunnitelman mukaan, kolmannen kerroksen jakavan murskeen (# 0...64 mm) paksuus on 0,5 metriä.

Routaselliin ladattavat näytteet otettiin parkkipaikan ja junaradan väliseltä alueelta. Koekuoppa kaivettiin ojan ja pysäköintialueen väliin. Koekuopan kaivusta ja putkinäytteen ottosyvyyksistä on esitetty periaatteet kuvassa 4.4.



Kuva 4.4. Putkinäytteenoton periaatepiirros.

4.2 Pohjatutkimukset

Koekohteen pohjatutkimusten korkotasoja mitattiin vaaituksella. Etäisyyksien määrittämiseen käytettiin tavanomaista työmaamittaa. Kohteeseen tehtiin yksi painokairaus vertailutiedoksi. Näytteenottoa suoritettiin sekä norjalaisella mäntäkairalla että putkinäytteenottomella. Lisäksi maa-ainesta kerättiin ämpäreihin ja saaveihin laboratoriotutkimuksia ja maa-ainesanalyysejä varten. Luoman seisakkeella suoritettavien pohjatutkimusten olosuhteita on havainnollistettu kuvassa 4.5



Kuva 4.5. Luoman seisakkeen pysäköintialueen pohjatutkimukset, koekohde.

Norjalaisella mäntäkairalla (\varnothing 54 mm) näytteet otettiin kolmeen putkeen maanpinnan tasosta syvyyksiltä 1,86-2,52; 2,52-3,32 ja 3,4-4,10 metriä. Kaikissa syvyyksissä maaines oli savea, jossa oli havaittavissa mustia sulfidipilkkuja, joita esiintyy kuvassa 4.6



Kuva 4.6. Koekohteen saven sulfidipilkkuja.

Häiriintymättömät routanousukoenäytteet (\varnothing 100 mm) otettiin erityisesti tehtävään tarkoitettulla putkinäytteenottomella. Pohjatutkimusten määrittely- ja suunnitteluvaiheessa oli tarkoitus ottaa häiriintymättömiä näytteitä kolmesta eri syvyydestä. Maanpinnasta laskien syvyyksiltä: 0,3;0,75 ja 1,05 metriä. Pohjatutkimusten aikana kaivettu koekuop-

pa kuitenkin täyttyi melko nopeasti vedestä, joten näytteitä otettiin ainoastaan tasoilta 0,55-0,7 ja 0,9-1,04 metriä maanpinnasta. Routaselikokeita varten ylemmältä tasolta otettiin kolme ja alemmalta tasolta viisi häiriintymätöntä näytettä.

Saaveihin kerättiin näytettä putkinäytteenoton yhteydessä näytteen yläpinnan tasolta. Ämpäreiden aines koottiin norjalaisen mäntäkairan reiästä tasoilta 0-0,2 metriä ja 0,2-0,56 metriä maanpinnasta. Näytteet edustivat pysäköintialueen rakennekerroksia. Kooste pohjatutkimuksista on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Näytteenottomenetelmät, maalaji (geotekninen maalajiluokitus), syvyys ja näytetunnus.

Näytteenottomenetelmä	Maalaji (Geo)	Syvyys (mp:stä)	Näyte
P-paikka/ämpäri	SrMr	0-0,2m	F1
P-paikka/ämpäri	srHkMr	0,2-0,56m	F2
Norjalainen mäntäkaira	laSa	1,86-2,52 m	101 (F13)
	liSa	2,52-3,3 m	102 (F14)
	liSa	3,4-4,10 m	103 (F15)
koekuoppa/saavi	saSi	0,5-0,75 m	T2 (F3)
koekuoppa/saavi	laSa	0,8-1 m	T20 (F4)
putkinäytteet (routanousukoe)	saSi	0,55-0,7 m	F5
			F6
			F7
			F8
	laSa	0,9-1,04 m	F9
			F10
			F11
			F12

4.3 Laboratoriokokeet

Routatutkimuksia varten Luoman koekohteen maa-aineksille suoritettiin useita laboratorio- ja luokituskokeita. Maan ominaisuudet ja luokituskokeiden tulokset toimivat routivuuden arviointiperusteena taulukossa 2.1 esitetyn mukaisesti. Maa-aineksen routivuuden yleisin arviointimenetelmä on näytteiden rakeisuusominaisuuksien tarkastelu. Tästä syystä rakeisuuden määrittämiseen liittyvät asiat olivat pääpainona laboratoriokokeissa. Maalajien luokitusominaisuuksia on esitetty taulukossa 4.1a.

Indeksikokeita tehtiin näytteille F1-F4 ja F13-F15. Routanousukokeita varten otetut putkinäytteet F5-F12 käytettiin myöhemmin routanousukokeissa. Koekuopasta otettuja maa-aineksia kokeissa edustivat F3 ja F4. Näytteet F3-F4 kerättiin häiriintyneinä saaviin putkinäytteiden vierestä. Kaikki laboratoriassa suoritettavat kokeet tehtiin ohjeen GLO-85 (SGY 1985) mukaisesti vastaten standardia CEN ISO/TS 17892-X:fi, Geotekniset laboratoriokokeet. Mikäli ohjeiden välillä esiintyi ristiriitoja, määräävänä normina pidettiin CEN ISO/TS 17892.

Laboratoriokokeita suoritettiin näytteille seuraavasti:

- Rakeisuuden määrittäminen kuivaseulonnalla F1 ja F2
- Areometrikokeet F1-F4 ja F13-15
- Areometrin jälkeinen hienoseula F14 ja F3
- Kiintotiheysmittaukset F13-15 ja F3-F4
- Kartiokokeet F3-F4 ja F13-F15
- Peruskäsittely (w % ja silmämääräinen maalaji F1-F15)

- Plastisuusluku F3-F4 ja F13-F15
- Humuspitoisuus F13-F15 ja F3-F4
- Kapillaarinen nousukorkeus F1-F2
- Vedenläpäisevyysödometri F13
- Tavallinen ödometri F13-F14

Taulukko 4.1a. Maalajien luokitusominaisuuksia laboratoriokokeiden perusteella.

Näyte	Maalaji(geo)	Maalaji(iso)	w	w*	γ_d	w _{val}	hi-%	sa-%
F1 (0-0,2 m)	SrMr	saGr	4,7		(2,1)	10,0		
F2 (0,2-0,5 m)	srHkMr	grSa	5,6	6,7	2,1	14,4		
F3 (0,5-0,75 m)	saSi	siCl	28,1	27,3	1,4	38,8	82,0	18,0
F4 (0,75-1,4m)	laSa	Cl	52,5	43,6	1,2	53,2	100,0	45,0
F13 (101) / 1,86-2,52 m	laSa	siCl	87,0				100,0	35,0
F14 (102) / 2,52-3,3 m	liSa	Cl	79,3				93,0	53,0
F15 (103) / 3,4-4,1 m	liSa	Cl	88,8				100,0	58,0
Näyte	humus-%	w _L	w _p	kapillaar	I _p	I _L	R _f	
F1 (0-0,2 m)				1,0				
F2 (0,2-0,5 m)				2,0				
F3 (0,5-0,75 m)	2,6	37,40	25,45		11,95	0,22	39,47	
F4 (0,75-1,4m)	1,6	47,90	30,90		17,00	1,27	93,95	
F13 (101) / 1,86-2,52 m	2,7	75,70	29,76		45,94	1,25	46,24	
F14 (102) / 2,52-3,3 m	0,4	48,40	29,83		18,57	2,66	101,84	
F15 (103) / 3,4-4,1 m	0,5	48,40	26,44		21,96	2,84	119,83	

(2,1)
w*

on oletus SrMr-kerroksen kuivatilavuuspainolle.
routanousukokeiden yhteydessä määritetty vesipitoisuus

4.4 Routanousukoe

4.4.1 Yleistä

Routanousukokeiden suoritustapa eivätkä koejärjestelyt ole kansainvälisesti täysin vaikiintuneet. Tässä työssä routanousukokeen suorituksen ohjeena toimi menetelmäkuvaus routanousukokeesta, joka on luotu VTT:ssä noin 20 vuoden kehitystyön ja kenttäverifiointin tuloksena. (Saarelainen 1992, Koskinen 1998.)

Laitteiston kalibrointi suoritettiin ennen tutkimukseen liittyviä lopullisia kokeita. Kalibroinnin yhteydessä ohjeena käytettiin menetelmäkuvausta: Australian Standard 2091-1981-PT100 ohm Din 43760-EN60 751 ALPHA 0.00385. Siirtymäantureiden toiminnassa ei havaittu mitään normaalista poikkeavaa. Näin ollen katsoimme, että siirtymäanturien osalta kalibrointi voitiin jättää suorittamatta. Lämpötila-antureiden kalibroinnin menetelmäkuvaus on esitetty liitteessä 1.

4.4.2 Näytteen asennus selliin

Routanousukokeissa käytetyt häiriintymättömät maanäytteet otettiin maasta tehtävään erityisesti rakennetulla putkinäytteenottimella. Ennen routaselliin asennusta näyte muokattiin selliin sopivaksi ja näytteen ylimääräisestä aineksesta määritettiin vesipitoisuus. Häiriintymätön, muotissa ja kylmähuoneessa säilytetty, näyte asennettiin routaselliin pohjaelementin päälle. Ylimääräistä ajankäyttöä näytteen lataamisessa pyrittiin välttämään saven löyhän olomuodon takia.

Pohjaelementin päällä oli huokoskivi ja tämän lisäksi näytteen ja kiven väliin asetettiin huokospaperi. Asennuksen aikana näytteen päälle vedettiin kumikalvo, joka ulotettiin myös pohjaelementin ympärille. Kumikalvo vedettiin ylös asti kannen ympärille ja se

puristettiin vesitiiviiksi kanteen ja pohjaan O-renkaita käyttäen. Lisäksi, ylimääräinen ilma näytteen ja kumikalvon välistä pyrittiin poistamaan imulla.

Routasellin runkoon levitettiin silikonilla – tällä pyrittiin minimoimaan sellin sisäseinän ja näytteen välistä kitkaa. Lopuksi, näytteen ympärille asennettiin halkaistavat routasellelementit, jotka kiristettiin tiukasti näytteen ympärille ruuveja ja kiristysvanteita apuna käyttäen.

Tämän jälkeen, lisättiin kuormituskehä routasellin ympärille ja asennettiin siirtymäanturi ja mittakello paikoilleen. Samassa yhteydessä tarkastettiin vesiastian korkeusasema, kuormituksen määrä ja siirtymäantureiden kiinnitys. Routaselliin asennetun näytteen halkaisija oli 100 mm ja korkeus 100 mm.

4.4.3 Näytteen valmistaminen kokeisiin

Ennen routanousukokeita näyte konsolidoitiin ja kyllästettiin mahdollisuuksien mukaan. Lisäksi, varsinaista routanousukoea edeltävä esiroutanousukoe voidaan lukea valmistavaksi toimenpiteeksi. Esiroutanousukokeen tarkoituksena oli saada näyte kyllästymään paremmin näytteen routimisen ja konsolidaation avulla.

Routanousukokeissa käytetyistä kolmesta maanäytteestä kaksi olivat savea. Johtuen savinäytteiden erittäin alhaisista vedenläpäisevyyksistä työssä suoritetuissa routanousukokeissa ei tehty varsinaista kyllästystä savinäytteiden osalta. Savien osalta kyllästysprosessi olisi ollut työn kannalta aivan liian pitkäaikainen prosessi, joten prosessin poisjättämistä voidaan pitää perusteltuna. Lisäksi, routanousukokeissa käytettyjä savinäytteitä voidaan pitää hyväkuntoisina, häiriintymättöminä ja luonnontilaisina, joten esiroutanousukokeiden suorittaminen savinäytteiden osalta ei ollut tarpeellista. Esiroutanousu kokeen suorittaminen on suositeltavaa mikäli (Onninen 2001b)

- näyte on rakennettu tai kun näyte ei ole ikinä routinut
- näyte on löyhä, häiriintynyt tai huonokuntoinen.

Kolmas maanäyte oli maalajiltaan srHkMr:a. Kokeissa käytetty maa-aines rakennettiin Luoman koekohteesta kerätystä materiaalista. Maa-aines oli syvyydeltä 0,2-0,5 m ja vastasi parkkipaikan jakavaa murske kerrosta. Näyte oli rakenteeltaan karkeampaa maa-ainesta, joten kyllästys suoritettiin kuvassa 4.7 esitetyllä tavalla.

Maanäytteen kyllästymisen nopeuttamiseksi vedenpinta nostettiin huomattavasti näytteen yläpinnan tasoa korkeammalle. Kyllästyksen aikana vedenpintaa pidettiin byretissä noin 88 cm näytteen yläpinnan yläpuolella. Näytteen kyllästyminen varmistettiin ylämäntään kiinnitetyn poistovesiputken avulla. Veden kulkiessa näytteen läpi alamännästä poistoputkeen näytettä voitiin pitää vedellä kyllästyneenä.



Kuva 4.7. Karkeamman maa-aineksen (F2-näyte) kyllästys.

Karkeamman maanäytteen valmistaviin toimenpiteisiin kuului lisäksi TPPT 6-ohjeen mukaisesti suoritettu esiroutanousukoe. Esiroutanousukokeessa kuormana käytettiin kokeen kannalta vain välttämättömiä rakenteita (kuormituskehä ja sellin ylämäntä), jotka muodostavat 2,45 kPa:n kuorman. Esiroutanousukokeen tarkoituksena oli saada näyte kyllästymään paremmin näytteen routimisen ja konsolidaation avulla.

4.4.4 Kuormittamaton koe

Ensimmäinen routanousukoe suoritettiin 2,45 kPa:n pintakuormituksella. Vesiastian pinta pidettiin koko kokeen ajan noin 5-10 mm sellin pohjan yläpuolella. Kansielementeissä kiertävän nesteen lämpötilaksi säädettiin $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Pohjaelementissä kiertävän nesteen lämpötila säädettiin $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$:een.

Kokeen aikana routasellin lämpötiloja ja siirtymiä mitattiin noin 5 minuutin aikavälillä. Routanousukokeiden kesto TPPT 6-ohjeen mukaan on vähintään 24 tuntia. Tässä työssä routanousukokeet kestivät keskimäärin noin 70 tuntia. Ohjeiden mukaan, koe voidaan lopettaa kun routarajan etenemiskuvaaja on ollut vaakasuora vähintään neljän viimeisen tunnin aikana. Routanousukokeen tuloksena syntyvä routanousukerroin kirjataan, kun routaraja ei enää tunkeudu alemmaksi. (Onninen 2001b.)

Kokeiden oikea-aikaista keskeyttämistä vaikeutti se, että reaaliaikaista kuvaajaa routarajan etenemisestä ei kyetty luomaan tiedonkeräyksen yhteyteen. Routanousukokeiden

tuloksien käsittelyn yhteydessä kuitenkin huomattiin, että kaikki kokeet saatettiin tarvittavan pitkälle kokeen tuloksen lukemisen kannalta.

4.4.5 Sulatukset

Sulatuksen ajaksi kuormituskehään asetettiin aina seuraavan kuormitus syklin painot. Poikkeuksena oli 40 kPa:n kuorma, jolloin sulatuskuormana käytettiin myös 40 kPa:a. Koekuorman ollessa 20 kPa:a sulatuksessa käytettiin 40 kPa:n kuormaa ja niin edelleen.

Sulatuksen aikana kansielementeissä kiertävien nesteiden lämpötiloja nostettiin. Pohjaelementissä kiertävän nesteen lämpötilaksi asetettiin +15 °C. Ohjeesta poiketen, kansielementin nestekierron lämpötilaksi asetettiin +1,0 °C eikä ohjeen mukaista -0,5 °C. Tämä oli mahdollista, koska sulatuksen yhteydessä sellistä poistuvalla vedelle oli lisätty poistoputki.

Mittausohjelman tallennusta jatkettiin jäädytyksestä aina sulatuksen loppuun. Seuraava routanousukoe aloitettiin, kun sulamispainuminen oli pidemmäksi aikaa pysähtynyt, aika-painumakäyrä ollessa vaakasuora. Useimmiten sulatus lopetettiin, kun näyte oli mittakellon mukaan painunut takaisin alkuperäiseen korkeuteensa.

Kannen hanaa pidettiin avoinna koko sulatuksen ajan konsolidaation nopeuttamiseksi. Sulatusprosessin aikana pyrittiin seuraamaan, ettei routasellin kansi ollut missään vaiheessa kiilautunut paikoilleen tai kallistunut.

4.4.6 Kuormitetut kokeet

Ensimmäinen kuormitettu routanousukoe tehtiin kuten aikaisempi 2,4 kPa:n kuormittamaton koe - ainoana erona oli käytettävä pintakuorma, joka oli 20 kPa. Kansielementeissä kiertävän nesteen lämpötilat pidettiin samoina eli -3 °C:ssa ja +1 °C:ssa. Toinen kuormitettu routanousukoe tehtiin samankaltaisesti, tällä kertaa pintakuorman ollessa 40 kPa. Pohja- ja kansielementeissä kiertävien nesteiden lämpötilat pysyivät aiempien kokeiden mukaisina.

4.4.7 Mittaustietojen keruu

Routanousukokeessa käytettiin aiemmin mainittua tiedonkeruujärjestelmää, johon kuuluivat

- tietokone
- mittausohjelma
- tiedonkeruulaite.

Mittaustietojen sähköisen tallennuksen ohessa käytettiin myös paperista pöytäkirjaa routanousukokeesta. Paperinen versio piti sisällään aikatiedot, anturien lukemat ja muut huomiot. Voidaan mainita, että muistiinpanojen päivittäminen ja ylläpito oli erittäin merkityksellistä tiedonkeruujärjestelmän tulosten purun ja analysoinnin yhteydessä.

4.4.8 Kokeen lopetus, näytteen purkaminen ja tulokset

Työssä ei tehty erillistä sulamispainumakoetta. Viimeisen kuormitus syklin jälkeen näyte poistettiin sellistä jäätyneenä. Tämän jälkeen, näyte kuvattiin, mitattiin, punnittiin ja muut tiedot arkistoitiiin jatkotoimenpiteitä varten.

Konkreettisia toimenpiteitä kokeen lopetuksen yhteydessä olivat

- routasellin avaaminen ja kumikalvon poistaminen
- lopullisten dimensioiden mittaaminen ja routarajan syvyyden kirjaaminen
- silmämääräisten havaintojen kirjaaminen (esim. näkyvät jäälinssit ja korkeus-
asemat, halkeamat)
- näytteen valokuvaaminen ja punnitseminen vesipitoisuuden määrittystä varten
- näytteen kuivaaminen uunissa ja vesipitoisuuden laskeminen.

Routanousukokeen tiedot tulostettiin kuvina eri pintakuormituksilla tehdyistä kokeista. Kuvissa esitetään kokeen aikainen routanousu (h), routan syvyys (z), nettoroudansyvyys (z-h) ja routanousukerroin (SP). Kuviin voidaan lisätä myös määritetty routanousukerroin vastaavalla pintakuormalla.

4.5 Kohteen tarkkailumittaukset ja havainnot

4.5.1 Ilman lämpötilamittaukset ja laitteisto

Talven 2011-2012 routamallinnuksessa käytetty lämpötiladata oli peräsin Ilmatieteen laitoksen kuukausittaisista ilmastokatsauksista. Talven 2012-2013 aikana ilman lämpötilaa tallennettiin koekohteessa EL-USB-2-LCD dataloggerin avulla. USB-mittari tallensi ilman lämpötilan lisäksi ilman suhteellisen kosteuden (RH%) sekä kastepisteen. Keskeisin tieto tämän työn kannalta oli päivän keskimääräinen lämpötila, joka voitiin laskea yksinkertaisesti mittarin tunnin välein tallentamasta lämpötiladatasta.

Tuotteen esitteessä mainitaan, että EL-USB-2-LCD laitteiston toiminta-alue lämpötiloilla vaihtelee $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$:een ja suhteellinen kosteus oli mahdollista määrittää 0-100%:iin. Laitteen keskimääräinen virhe lämpötilan osalta on $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhteellisen kosteuden osalta $\pm 3,0\text{ }%$. Tuotteen oli valmistanut Lascar Electronics Ltd. Kyseinen USB-tallennin on esitetty kuvassa 4.8. Liitteessä 5 on esiteltynä talvien 2011-2012 ja 2012-2013 päivittäisiä keskiarvo lämpötiloja ja kokonaispakkasmäärä Luoman koekohteessa. Kuvassa 4.11 on esitetty ilman lämpötilaprofiilin tallennin (EL-USB-2-LCD) sijainti Luoman koekohteessa.

Lämpötiladatan vertailukohteena käytettiin Salon ja Hki-Vantaan sääasemien lämpötilatietoja talven 2012-2013 ajalta. Lämpötilakontrollin tuloksena Luoman koekohteen lämpötiladataa voitiin pitää realistisena. Kohteessa USB-tallennin oli asetettu noin 2 metrin korkeuteen maanpinnasta. Lisäksi kaappi oli maalattu valkoiseksi ja rei'itetty ilma-kierron mahdollistamiseksi. Nämä toimenpiteet suoritettiin auringon säteilyn vaikutusten minimoimiseksi.



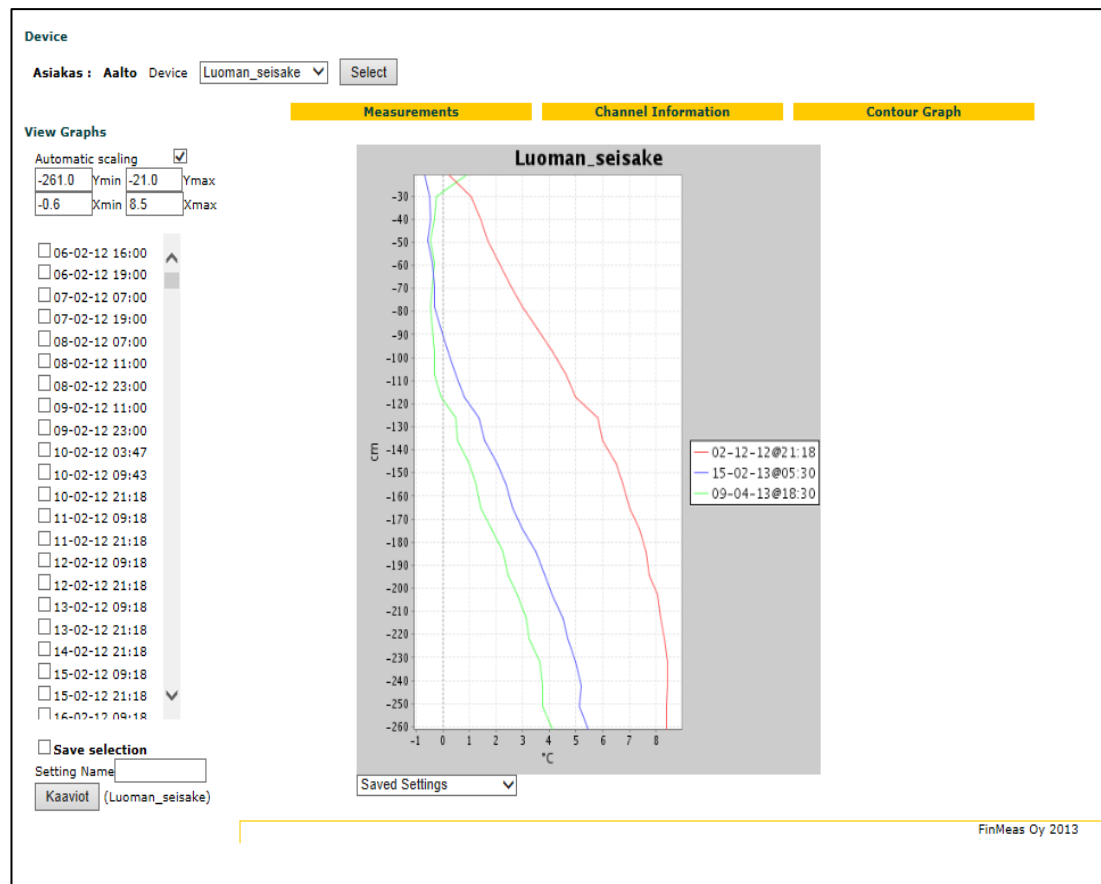
Kuva 4.8. Koekohteessa käytetty ilman lämpötiladatan tallennin, EL-USB-2-LCD.

4.5.2 Maaperän lämpötilamittaukset ja laitteisto

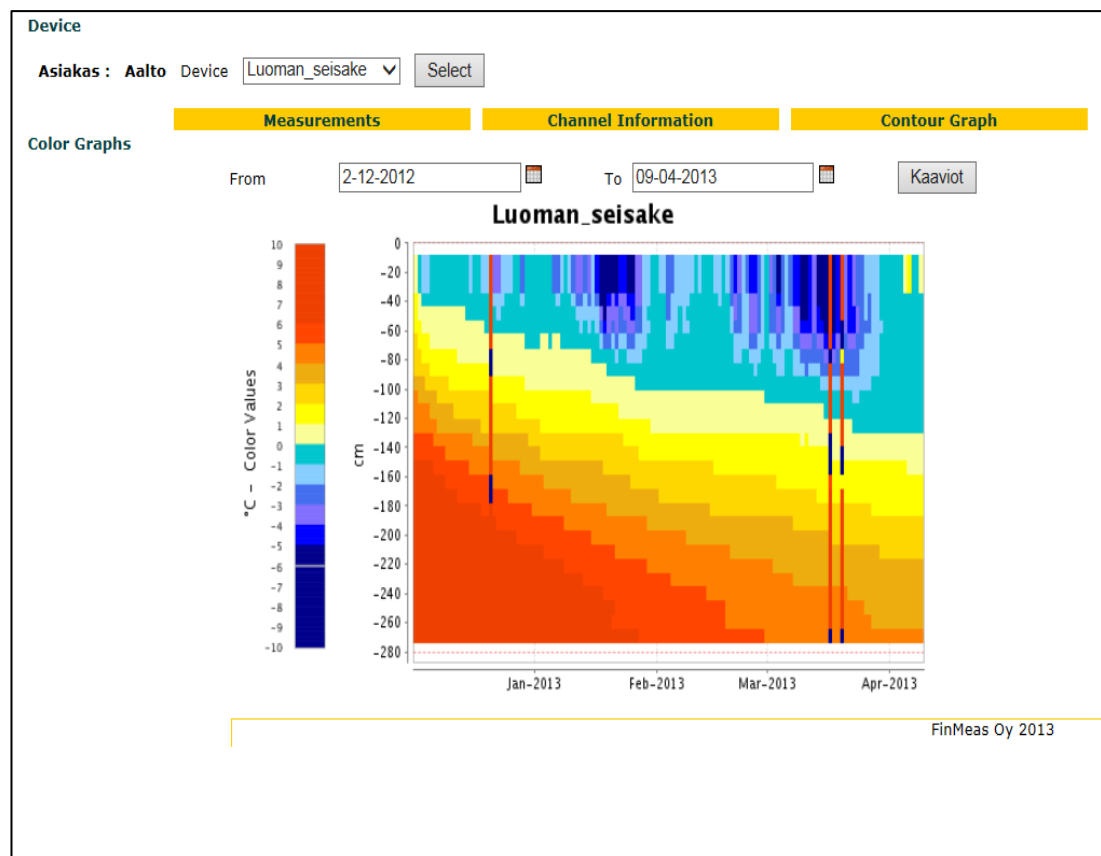
Tässä työssä maaperän lämpötilatiedot tuotti Finmeas Oy:n etäpalvelu. Lämpötilatietoja on vielä työn julkaisuhetkellä mahdollisuus lukea verkosta osoitteesta: <http://ec2-176-34-224-223.eu-west-1.compute.amazonaws.com/mesu/welcomeView.do>. Tällä hetkellä palveluun pääsee kirjautumaan sisään käyttämällä tunnusta: Aalto ja salasanaa: mittaus.

Lämpötilan mittauspisteet oli sijoitettu tasaisin 100 mm välein alkaen -0,21 m ja päättyen -2,61 m maanpinnasta. Palvelimelta oli mahdollista saada tietoja 6.2.2102 lähtien aina tähän hetkeen saakka. Mittaustiheys oli keskimäärin noin kaksi mittausta päivässä.

Palvelussa tiedot esitettiin kuvaajina, mutta myös numerodataa oli mahdollista saada käyttöön. Kuvassa 4.9 on esitetty selainäkymä palvelimelta, kun on valittu tiettyjä mittaustajankohtia. Kuvassa 4.10 on havainnollistettu maaperän roudansyvyyden kehittyminen mittausvälillä talven 2012-2013 aikana. Kuvassa 4.11 on esitetty lämpötilaprofiilin mittauslaitteen sijainti Luoman koekohteessa.



Kuva 4.9. Lämpötilaprofiili eri syvyyksiltä kolmena valittuna mittausajankohtana.

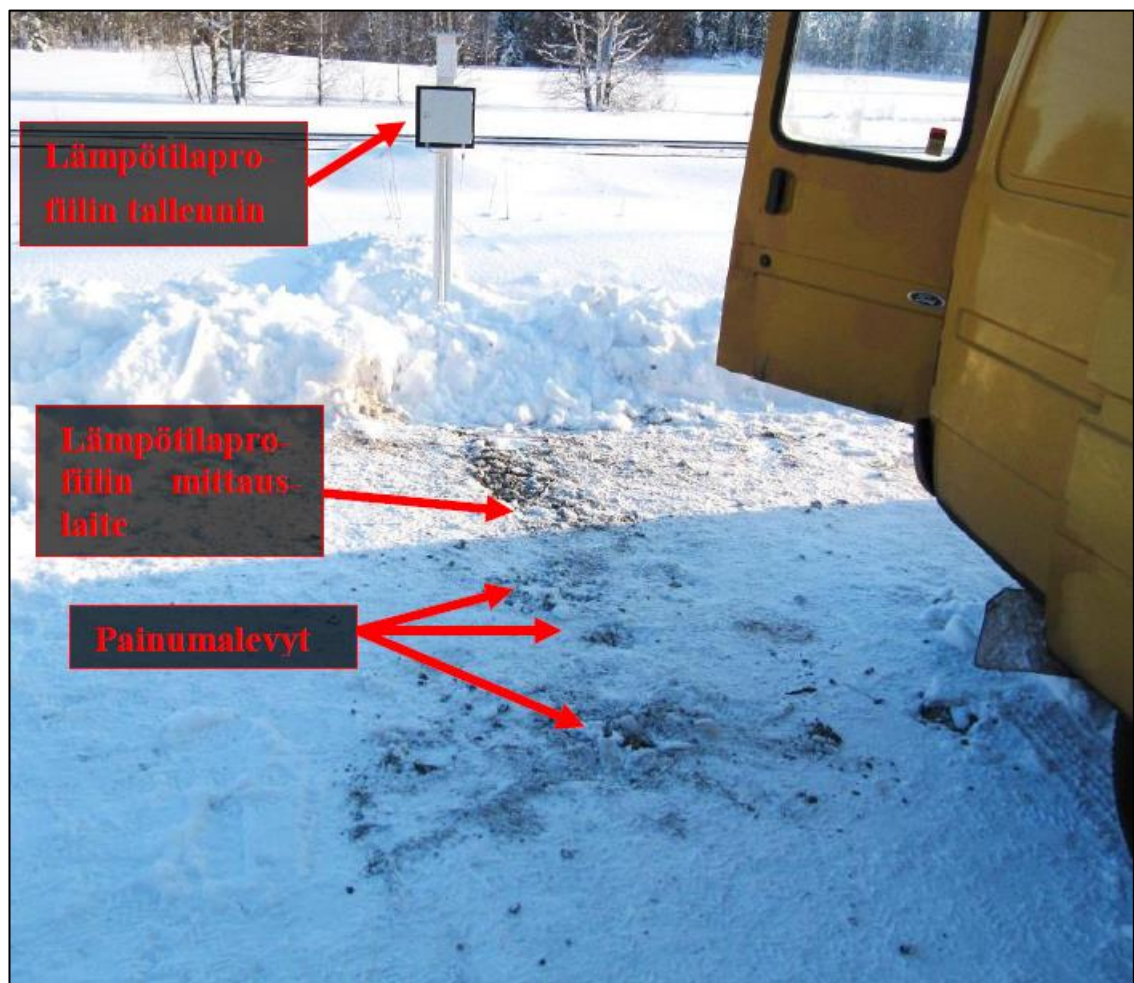


Kuva 4.10. Talven 2012-2013 roudansyvyyyden kehitys.

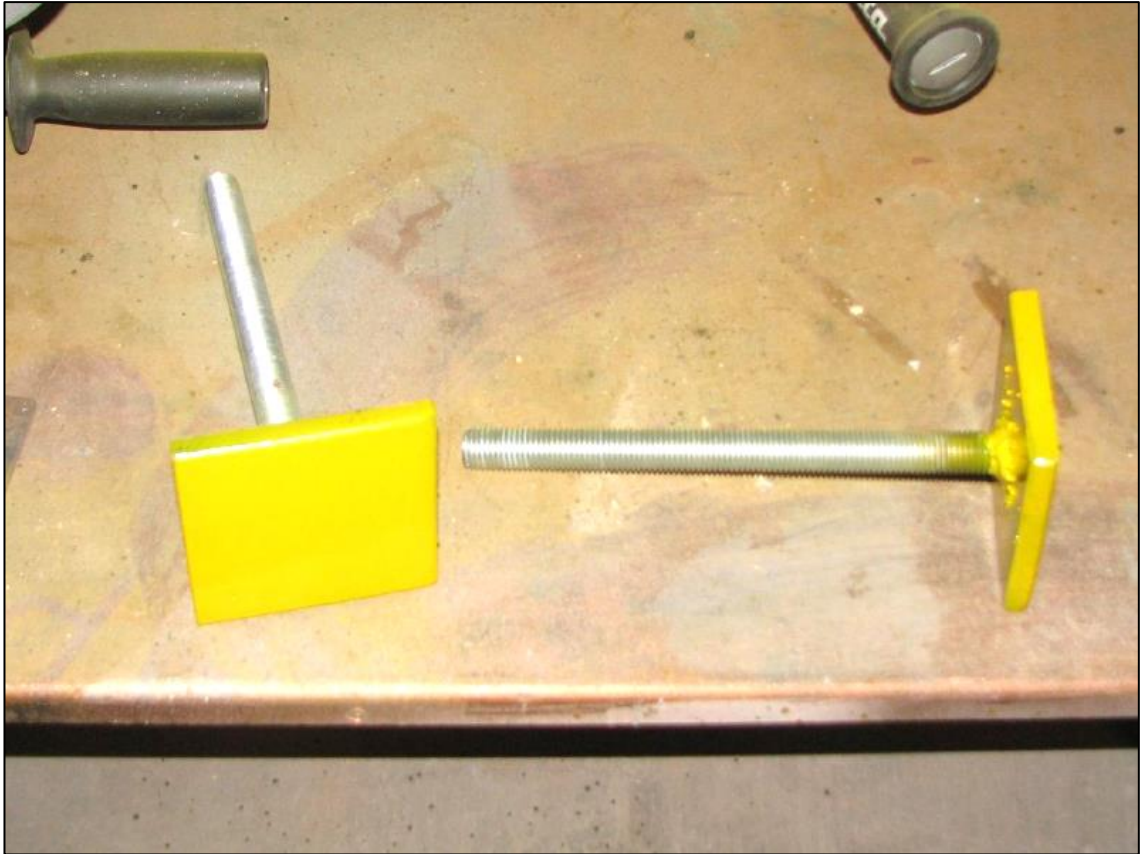
4.5.3 Routanousuhavainnot ja laitteisto

Routanousuhavainnot kohteesta suoritettiin vaaitsemalla routanousun mittauspisteet (3 kpl) ja kiintopiste keskimäärin viikon välein. Vaaitseminen tehtiin vaaituskojeella ja mittauslatalla. Kohteessa tehtiin routanousuhavaintoja sekä talvella 2011-2012 että 2012-2013.

Routanousun mittauspisteet sijaitsivat pysäköintialueella lämpötilamittauspisteen välittömässä läheisyydessä. Routanousun mittauspisteet oli lyöty maahan 200 mm:n syvyyteen (M16 kierretanko). Maanpinnalla kierretangon yläpäässä oli 100x100x5 mm:n teräslevy. Routanousun mittauspisteitä (painumalevyt) oli kolme kappaletta ja niiden sijainti on esitetty kuvassa 4.11 – painumalevyn rakenne on esitetty kuvassa 4.12. Kiintopisteenä käytettiin ajojohdinpylvään (nro.27+960) kiinnityslevyn kulmapultin yläpäätä. Tämän rakenteen osalta siirtymiä ei oletettu tapahtuvan.



Kuva 4.11. Routamittauslaitteisto asennettuna (Bäcklund 2013).



Kuva 4.12. Luoman seisakkeelle asennettuja painumalevyjä (Kuva: Gustavasson 2013).

4.6 Maa-ainekset

4.6.1 Routanousukoenäytteet

Routanousukokeissa testattavina maa-aineksina käytettiin näytteitä F2, F6 ja F11. Näiden näytteiden osalta tehtiin ainoastaan routanousukokeita, jonka tuloksena saatiin routanousukertoimet myöhempään tietokonemallinnusta varten. Tämän työn kannalta merkittävimmät näytteet olivat F1-F12.

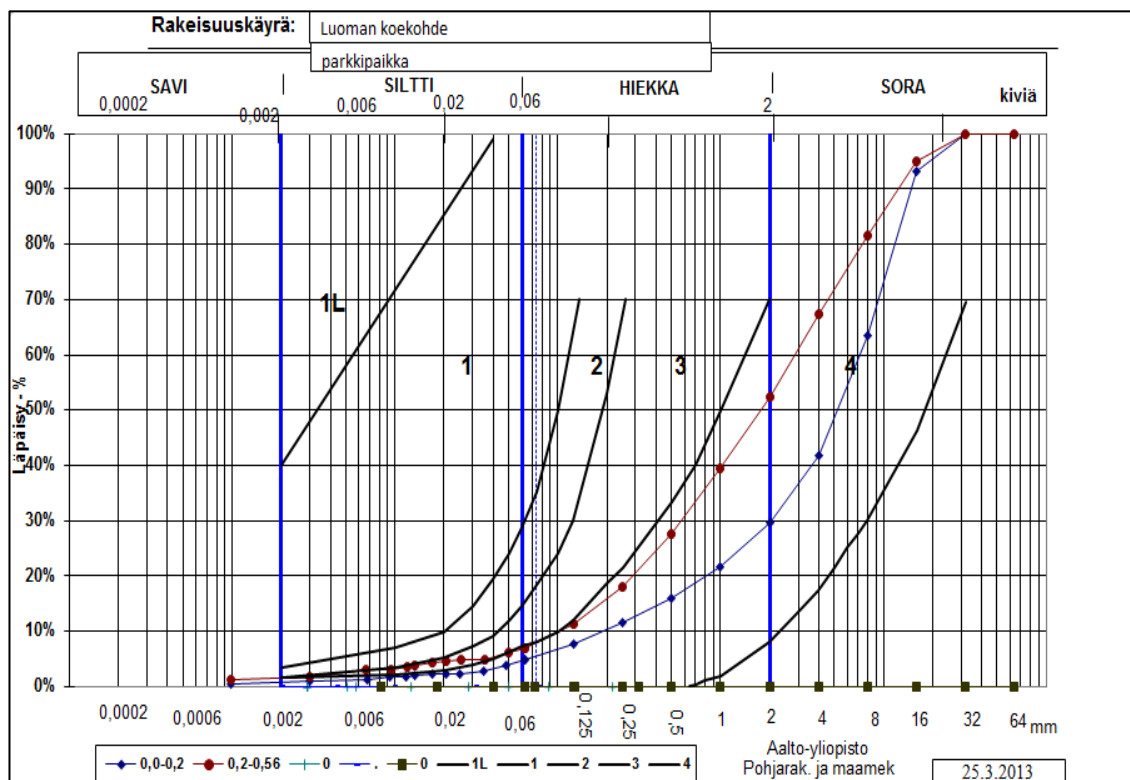
Näytteistä F2 edusti Luoman seisakkeen P-paikan jakavaa sora-kerrosta. Jakavan soran maalaji oli geoteknisen maalajiluokituksen perusteella srHkMr. Näyte F6 edusti parkki-paikan rakennekerrosten alla olevaa 0,25 metrin paksuista saSi-kerrosta. F11 oli alin kerros, joka huomioitiin roudan syvyyden ja routanousun mallinnuksessa. Kerroksen katsottiin pohjatutkimusten perusteella ulottuvan ainakin 1,4 metriin. Roudan syvyyden ja routanousun mallintamisen kannalta tämä oli keskeinen huomio, koska havaintojen perusteella roudan syvyys oli alimmillaan 10.4.2013 -1,18 m maanpinnan tasosta. Mallinnuksessa käytetyn alimman kerroksen geotekninen maalajiluokitus oli laSa. Häiriintymättömien näytteiden ottoa koekohteessa on esitetty kuvassa 4.13.



Kuva 4.13. Vasemmalla putkinäytteen ottoa (F5-F12) ja oikealla norjalaisen mäntäkairan näytteenottoa (F13-F15).

4.6.2 Parkkipaikan rakennekerrokset

Parkkipaikan rakennekerrosnäytteet F1 ja F2 olivat geoteknisen maalajiluokituksen mukaisesti soraista moreenia (SrMr) ja soraista hiekkamoreenia (srHkMr). Vastaavasti ISO 14688-2-luokituksen mukaan, F1-aines oli saGr (sandy gravel) ja F2-aines grSa (gravelly sand). Lisäksi maanäytteiden peruskäsittelyn yhteydessä maa-ainesten vesipitoisuudet määritettiin. Kantavan murskeen vesipitoisuus oli 4,7 % ja jakavan kerroksen 5,62 %. Kuvassa 4.14 on esitetty maa-ainesten rakeisuuskäyrät.



Kuva 4.14. F1 ja F2 rakeisuuskäyrät routivuuden arviointipohjalla.

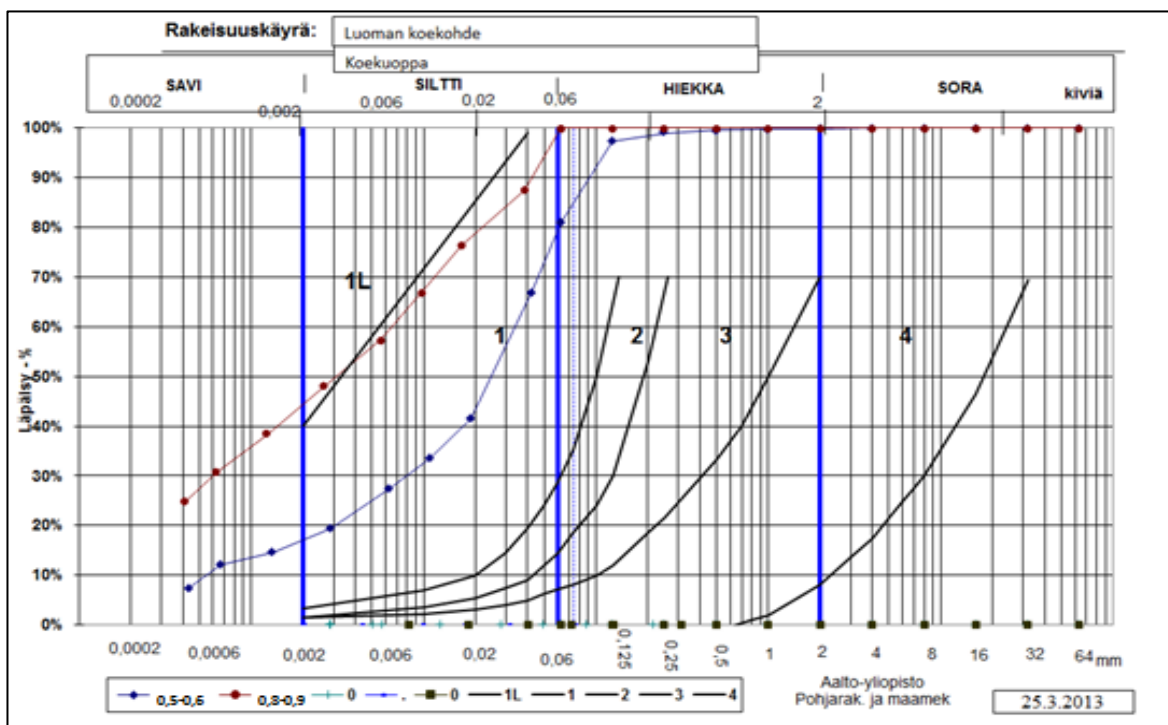
Yllä olevasta kuvasta 4.14 havaitaan, että F1-aineoksen koko rakeisuuskäyrä sijaitsee alueella 4, eikä missään vaiheessa poikkea alueen ulkopuolelle vasemmalta puolelta.

Näin ollen, parkkipaikan pintakerroksen kantava murske (0-0,2 m) ei ole rakeisuuden perusteella routivaa. F2-aineksen rakeisuuskäyrä sijaitsee pääosin alueella 4, mutta pienempien seulojen kohdalla siirtyy alueelle 3. Tällöin pysäköintialueen jakavan sora kerroksen (0,2-0,56 m) voidaan olettaa olevan rakeisuuteen perustuvan routivaukskriteerin mukaisesti routivaa.

4.6.3 Koekuopan maa-ainekset

Koekuopan näytteet F3 ja F4 olivat geotekniseltä maalajiluokitukseltaan savista silttiä (saSi) ja laihaa savea (laSa). ISO- maalajiluokituksen mukaan ainekset olivat siCl:tä (silty clay) ja Cl:tä (clay).

Maanäytteiden peruskäsittelyn yhteydessä F3-aineksen vesipitoisuudeksi määritettiin 28,06 %. Maa-ainesten peruskäsittelyn aikana näytteen katsottiin silmämääräisesti olevan ruskean harmaata kuivasavea. F4-aines oli silmämääräisesti vihreän harmaata savea ja aineksen vesipitoisuudeksi määritettiin 52,5 %. Laboratoriokokeissa ainesten keskiarvoiseksi kiintotiheydeksi määritettiin 2,68 g/m³. Humuksen määrittäksessä F3-aineksen humuspitoisuudeksi saatiin 2,57 % ja vastaavasti F4-aineksen 1,61 %. Lisäksi näytteistä laskettiin maa-ainesten konsistenssirajoja routivuuden arviointia varten. Kuvassa 4.15 on esitetty koekuopan maa-ainesten rakeisuuskäyrät.



Kuva 4.15. F3 ja F4 rakeisuuskäyrät routivuuden arviointipohjalla.

Kuvasta 4.15 havaitaan, että F3-aineksen rakeisuuskäyrä pysyi alueella 1. Tämän perusteella koekuopan maa-aines syvyydeltä 0,5-0,6 m maanpinnasta oli routivaa. F4-aineksen rakeisuuskäyrä sijaitsee pääosin alueella 1 väistyen pienempien seulojen kohdalla alueen 1L puolella. Tässä tilanteessa voidaan sanoa, että F4-aines oli rakeisuuteen perustuvan routivaukskriteerin mukaan routivaa tai lievästi routivaa.

5 Maa-ainesten routivuus

5.1 Routivuus luokitusominaisuuksien perusteella

Taulukkoon 5.1 on kerätty routanousun ja roudan syvyyden mallintamiseen keskeisimmän vaikuttavien maa-ainesten routivuusluokituksia ISSMFE 1989a:n mukaan. Norjalaisia häiriintymättömiä mäntäkairanäytteitä ei tässä yhteydessä tuotu esille, koska näiden maa-ainesten routivuusominaisuudet eivät olleet merkittäviä mallintamisen kannalta.

Plastisuuslukuun ja juoksurajaan perustuvan routivuuskriteerin mukaan sekä F3 että F4 näytteet kuuluivat erittäin routivaan luokkaan. Kapillaarisuuteen perustuvan routimiskriteerin mukaan näyte F1 oli lievästi routivaa ja F2 kohtalaisesti routivaa. Hienousluvun mukaan F3 ja F4 olivat erittäin routivia maa-aineksia. Tässä yhteydessä on kuitenkin syytä huomata, että hienoustekijää ei suositella sovellettavaksi tilanteessa, joissa maa-aines on pääosin hienorakeista (kts 2.3.5) Juoksevuusluvun perusteella F3 oli lievästi routivaa ja F4 erittäin routivaa.

Taulukkoa 5.1 tarkastellessa voidaan huomata, että ainoa poikkeama esitettyjen routivuuskriteerin välillä esiintyi näytteen F3 osalta. Näytteen routivuus vaihteli lievästi routivasta erittäin routivaan riippuen routivuuskriteerin käytöstä. Lisää routivuuskriteerien mukaisista tuloksista ja vertailusta kappaleessa 7.2.

Taulukko 5.1. Maa-ainesten routivuuden arviointia ISSMFE 1989a:n mukaan. Routivuuskriteerit on esitetty aikaisemmin taulukossa 2.1.

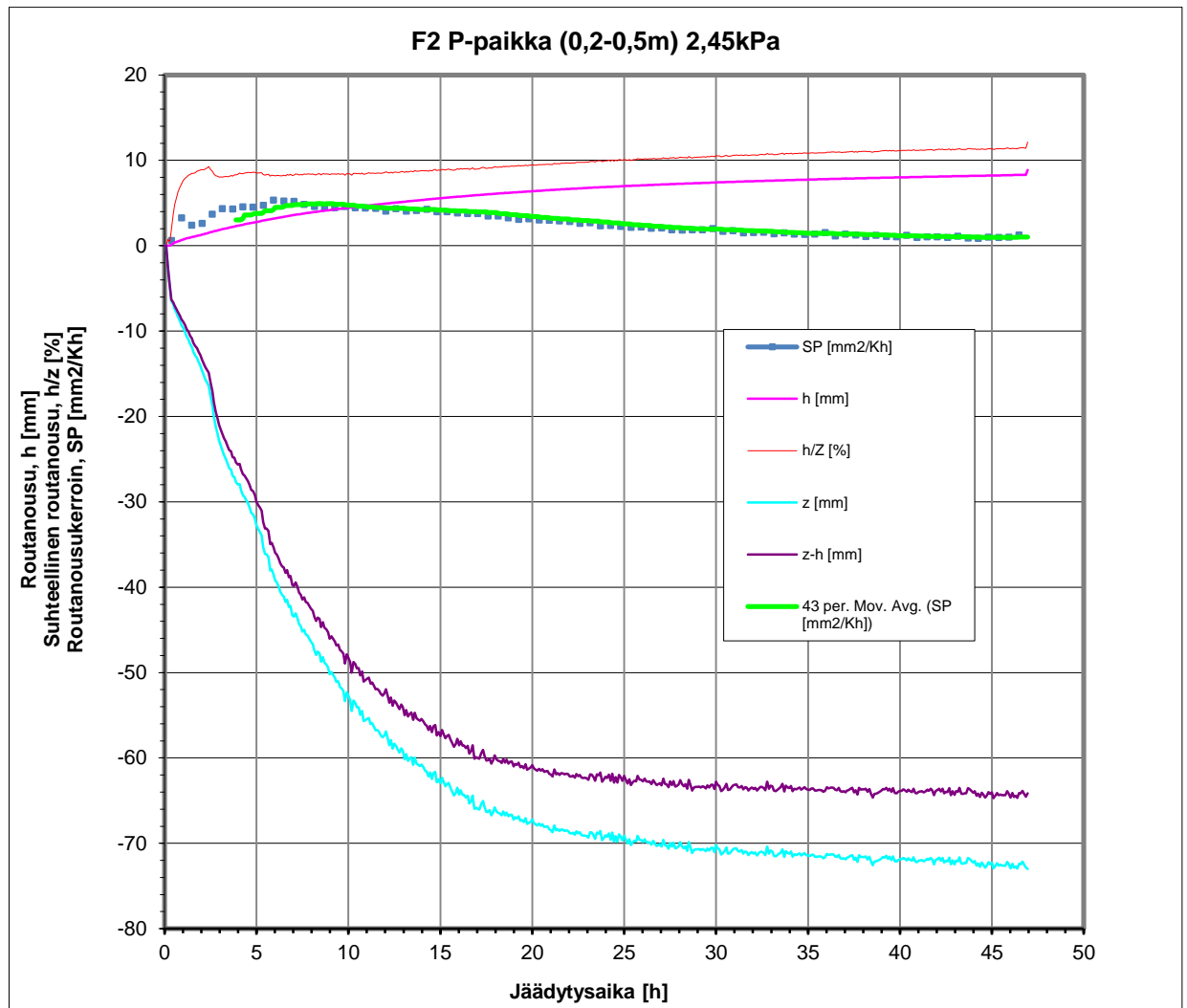
Näytetunnus ja routivuusluokitus (taulukon 1. perusteella)	Plastisuusluku I_p ja juoksuraja w_L	Kapillaarisuus (m)	Hienousluku R_f	Juoksevuusluku I_L
F1 Routivuus	NA	1 Lievästi routivaa	NA	NA
F2 Routivuus	NA	2 Kohtalaisesti routivaa	NA	NA
F3 Routivuus	11,95 / 37,4 Erittäin routivaa	NA	39,47 Erittäin routivaa	0,218 Lievästi routivaa
F4 Routivuus	17 / 47,9 Erittäin routivaa	NA	93,95 Erittäin routivaa	1,27 Erittäin routivaa

5.2 Routanousukerroin (SP) routanousukokeiden perusteella

5.2.1 Näyte F2 – parkkipaikan rakennekerros, srHkMr

Näytteen F2 osalta routanousukokeita suoritettiin yhteensä 5 kappaletta. Kokeet suoritettiin normaalisti 2,45; 20; 40 ja 2,45 kPa:n kuormilla, ja normaalin koesyklin lisäksi suoritettiin vielä kolmas nollakuorman (2,45 kPa) routanousukertoimen määrittäminen. Tämän tarkoituksena oli osaksi tarkastella näytteen routanousukertoimen käyttäytymistä, kun näytettä käytettiin routanousukertoimen määrittämiseen useammin kuin kerran. Riippuen lähteistä näytteellä suoritettavien kokeiden määrästä on olemassa poikkeavaa tietoa. Tärkein syy ylimääräisille nollakuormakokeille oli se, että maa-aineksen routivuus routanousukokeissa määritetään nollakuorman (2,45 kPa) perusteella.

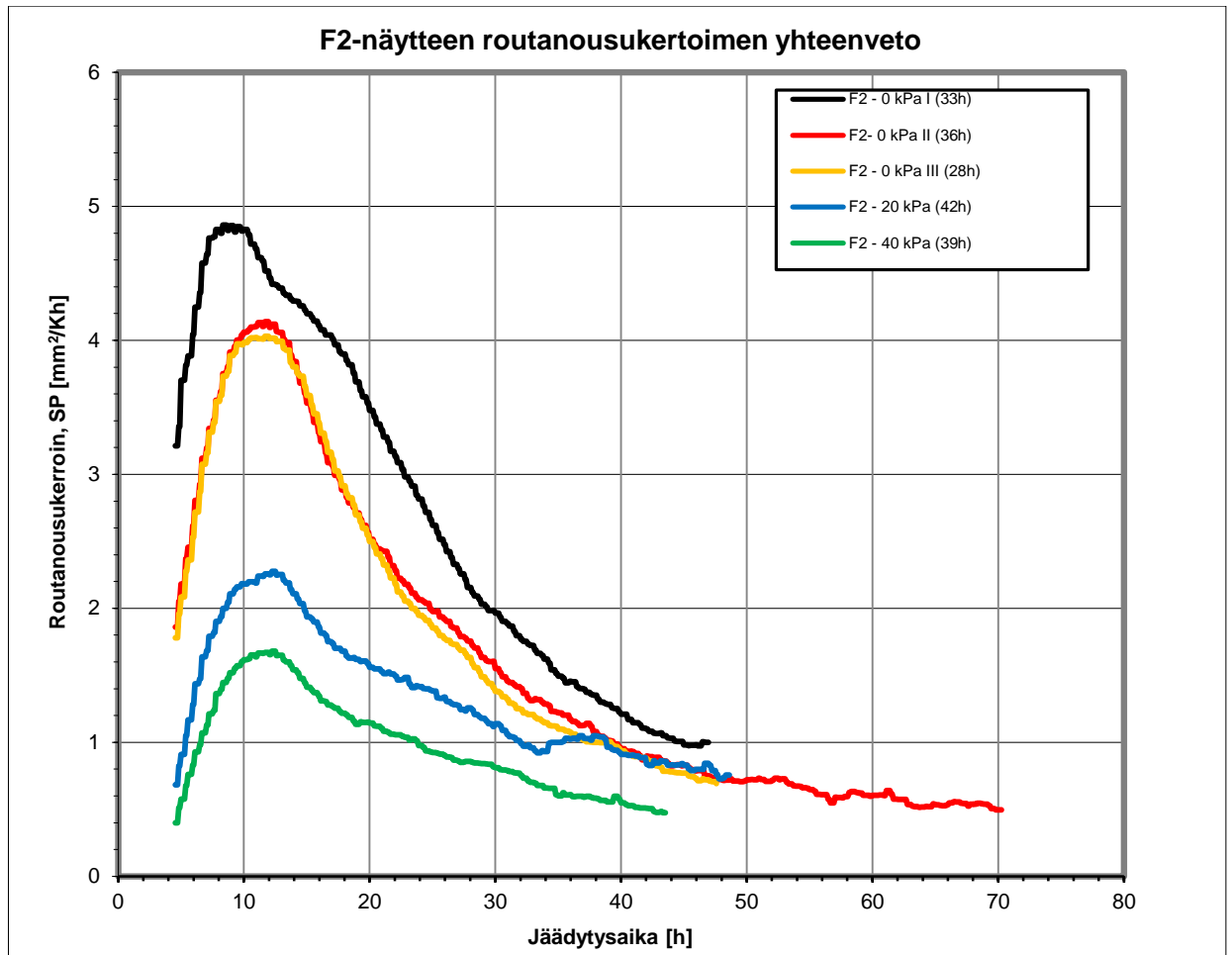
Kuvassa 5.1 on esitetty maa-aineksen ensimmäinen routanousukoe. Kuvaajissa SP edustaa routanousukerrointa, h routanousua, h/z suhteellista routanousua ja z roudan syvyyttä. Koesyklin muut routanousukoetulosteet löytyvät liitteestä 2.



Kuva 5.1. Näytteen F2 routanousukoe tuloste, ensimmäinen 2,45 kPa:n koe.

Näytteen routanousukerroin määritettiin, kun roudan eteneminen oli tasaantunut vähintään 4 tunnin ajaksi. Tämän perusteella voimme havaita, että F2-näytteen ensimmäisen routanousukokeen tulos eli routanousukerroin (SP) oli luokkaa $1,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$:a 33 tunnin kohdalla. ISSMFE:n 1989 esittämillä routimiskriteereillä (Taulukko 2.1) maa-aines oli lievästi routivaa.

Kuvassa 5.2 on esitetty näytteen routanousukokeiden yhteenvetokuvaaja. Kuvaajassa on tunnuksen yhteydessä esitetty käyrään liittyvä kuormitus ja suluissa routanousukertoimen määrittäjäajankohta tunteina kokeen aloituksesta lukien. Taulukossa 5.2 on esitetty näytteen routanousukertoimet (SP) taulukkoon eri kuormituksilla. Edellä mainittujen perusteella huomataan, että tässä työssä suoritettujen kokeiden mukaan routanousukertoimella ja kuormituksella oli selvä korrelaatio.



Kuva 5.2. F2-näytteen routanousukertoimien yhteenvetokuvaaja.

Taulukko 5.2. Näytteen F2 routanousukertoimet eri kuormituksilla.

Näyte	Kuorma	yksikkö	SP (routanousukerroin)	yksikkö
F2	2,45 (I)	kPa	1,5	mm ² /Kh
F2	2,45 (II)	kPa	1,25	mm ² /Kh
F2	2,45 (III)	kPa	1,5	mm ² /Kh
F2	20	kPa	0,8	mm ² /Kh
F2	40	kPa	0,5	mm ² /Kh

Routanousukokeiden jälkeen näytteet kuvattiin kuvassa 5.3 esitetyllä tavalla. Jäätynneestä näytteestä kirjattiin huomioita ja määritettiin vesipitoisuus. Näytteen F2 keskimääräinen korkeus viimeisen kokeen jälkeen oli 108,2 mm. Kuten aikaisemmin on mainittu, routanousukokeessa käytettävät näytteet muokattiin ennen koetta niin, että niiden halkaisija oli 100 mm ja korkeus 100 mm. F2 näytteessä ei ollut kokeen jälkeen silmin havaittavia jäälinssejä.

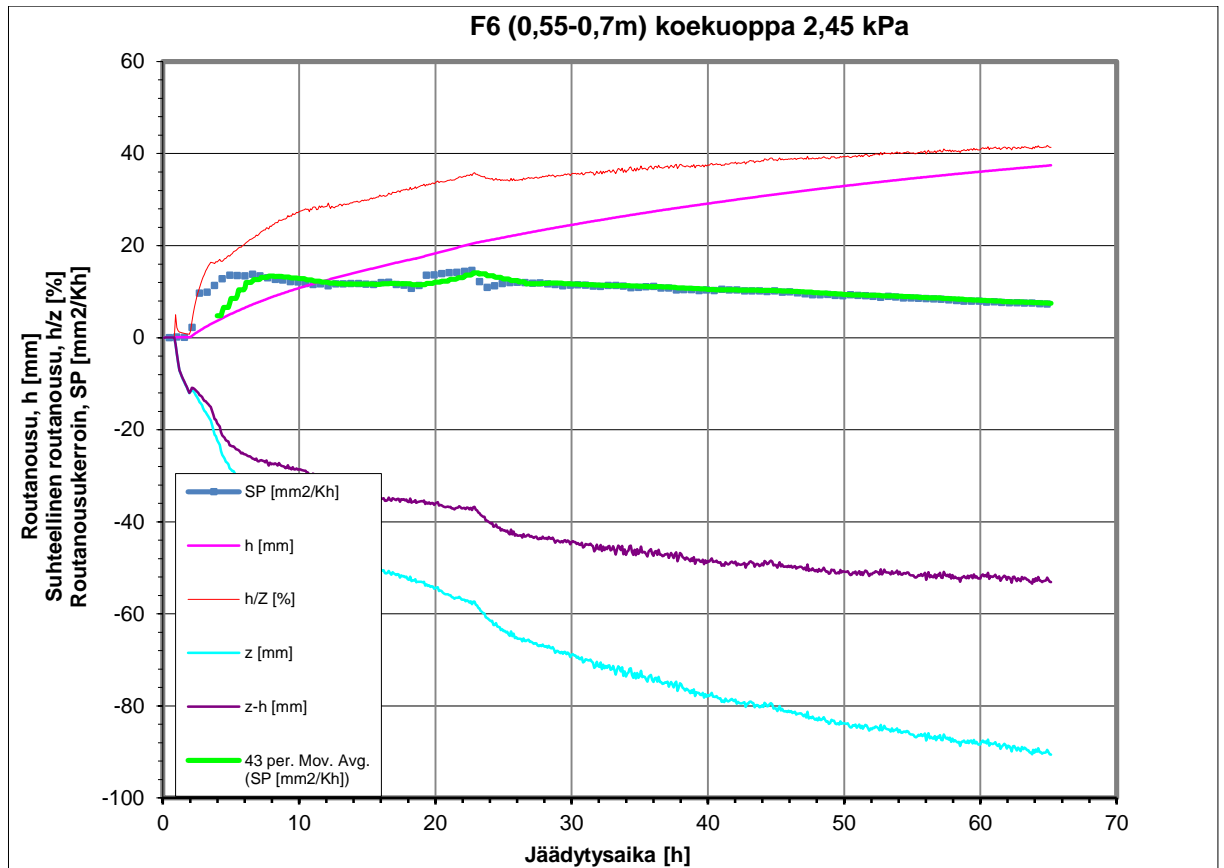


Kuva 5.3. Näyte F2 routanousukokeen jälkeen.

5.2.2 Näyte F6 – koekuopan ylempi syvyys, saSi

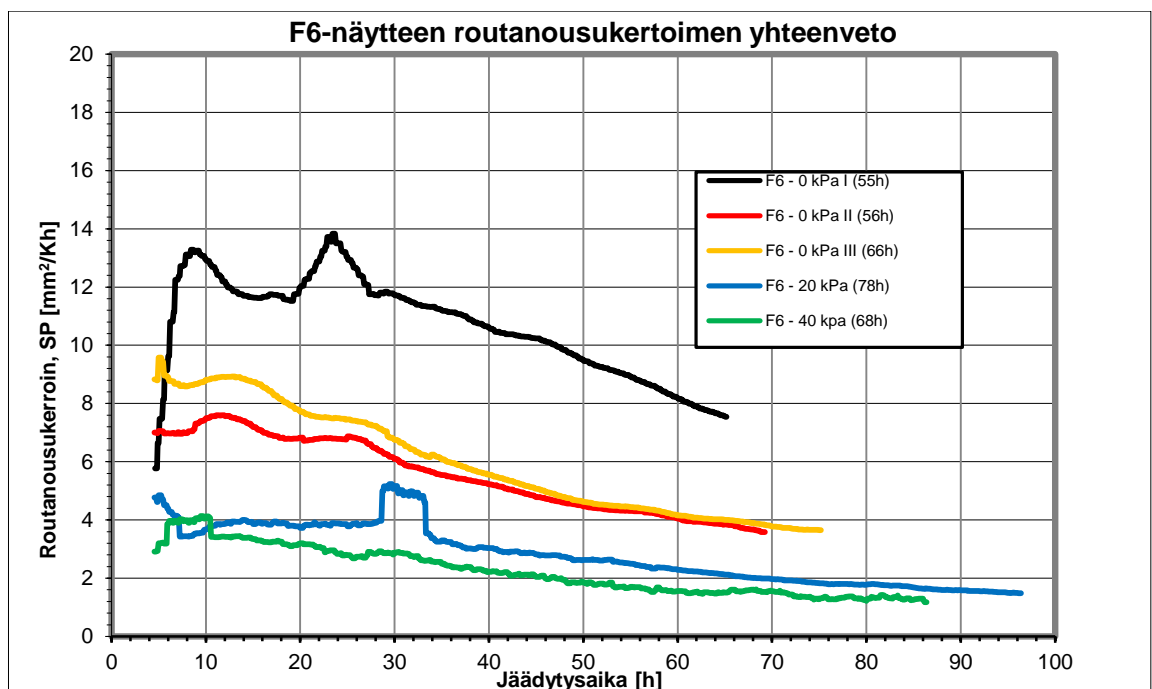
Koekuopan ylemmän kerroksen näytteelle (F6) tehtiin 5 erillistä routanousukoetta. Perinteisen koesyklin (2,45; 20, 40 ja 2,45kPa) lisäksi näytteelle F6 määritettiin vielä kolmas nollakuorman (2,4 kPa) routanousukerroin.

Kuvasta 5.4 huomataan, että koekuopan ylempi saSi-kerros (F6) oli huomattavasti edellä esitettyä parkkipaikan jakavaa murske-kerrosta (F2) voimakkaammin routivaa. F6-näytteen ensimmäisen routanousukokeen roudan syvyyden eteneminen tasaantui 55 tunnin kohdalla. Tällöin näytteelle saatiin kuvaajasta määritettyä noin $8,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ routanousukerroin ja maa-aineksen katsottiin olevan erittäin routivaa (kts.Taulukko 2.1).



Kuva 5.4. Näytteen F6 routanousukoetuloste, ensimmäinen 2,45 kPa:n koe.

Koesyklin muut routanousukoetulosteet löytyvät liitteestä 3. Kuvassa 5.5 on esitetty näytteen routanousukertoimien yhteenveto. Routanousukertoimet eri kuormituksilla on esitetty taulukossa 11. Edellä esitetyn perusteella routanousukertoimella ja kuormalla oli korrelaatio suhde.

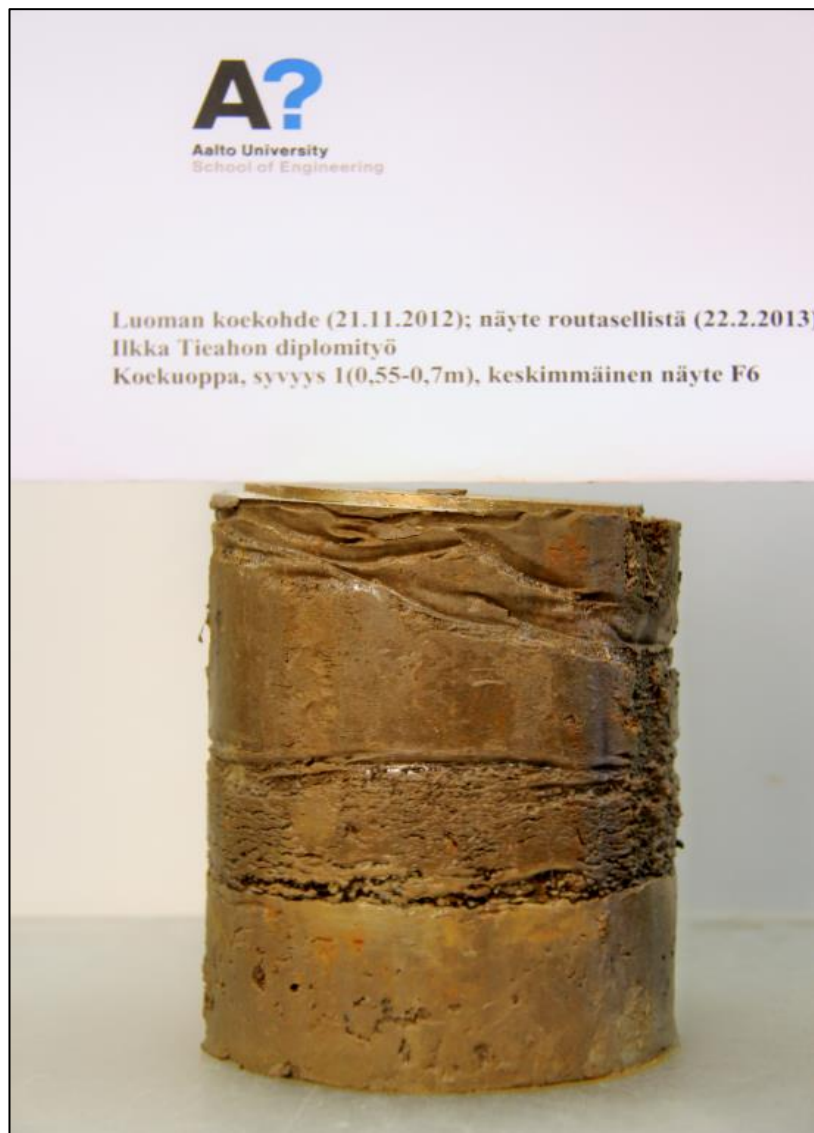


Kuva 5.5. Näytteen F6 routanousukertoimien yhteenvetokuvaaja.

Taulukko 5.3. Näytteen F6 routanousukertoimet eri kuormituksilla.

Näyte	Kuorma	yksikkö	SP (routanousukerroin)	yksikkö
F6	2,45 (I)	kPa	8,5	mm ² /Kh
F6	2,45 (II)	kPa	4,4	mm ² /Kh
F6	2,45 (III)	kPa	4	mm ² /Kh
F6	20	kPa	1,9	mm ² /Kh
F6	40	kPa	1,4	mm ² /Kh

Kuvassa 5.6 on esitetty näyte F6 routanousukokeiden jälkeen. Näytteessä F6 havaittiin jäälinsejä näytteen yläpinnasta lähtien tasoilla -70 mm, -50 mm ja -15 mm. Kuten aiemminkin näytteen halkaisija ennen koetta oli 100 mm ja korkeus 100 mm. Näytteen keskimääräinen korkeus viimeisen routanousukokeen jälkeen oli 121,6 mm. Lisäksi kuvasta huomattiin, että membraani (näytteen ympärille vedettävä kumikalvo) oli liikkunut näytteen yläpinnan tasolla kokeiden aikana.

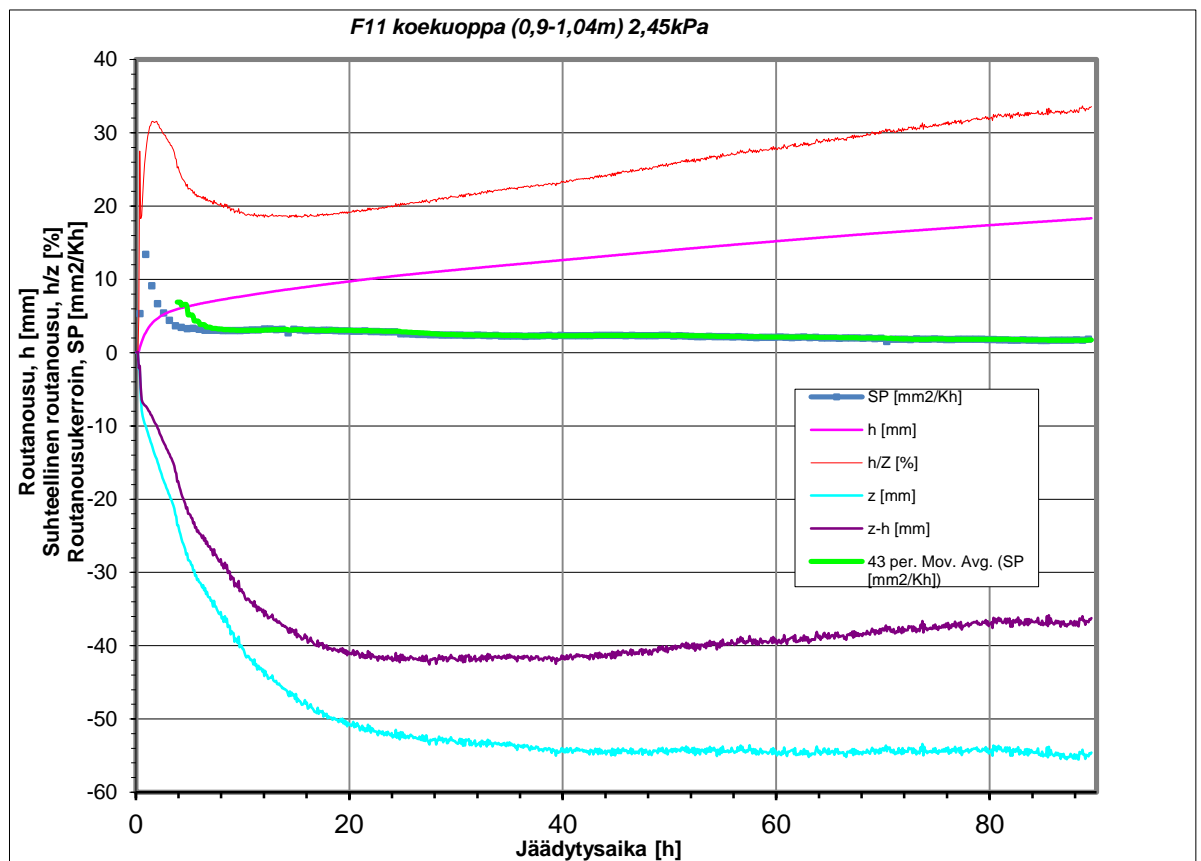


Kuva 5.6. Näyte F6 routanousukokeiden jälkeen.

5.2.3 Näyte F11 – koekuopan alempi syvyys, laSa

Koekuopan alemman syvyyden näytteelle (F11) suoritettiin 4 erillistä routanousukoetta normaalilla koesyklillä. Kuvassa 5.7 on esitetty F11-näytteen nollakuormalla (2,45 kPa) suoritettun routanousukokeen kuvaaja.

F11 näytteen roudan syvyyden eteneminen kokeessa tasaantui 28 tunnin kohdalla. Tällä hetkellä näytteen routanousukertoimen katsottiin olevan $2,49 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. ISSMFE:n routivuuskriteerien mukaan (taulukko 2.1) maa-aines kuului keskinkertaisesti routivaan routivuusluokkaan. Huomataan, että näyte F11 oli voimakkaammin routivaa kuin F2 maa-aines, mutta selvästi vähemmän routivaa kuin F6 maa-aines.



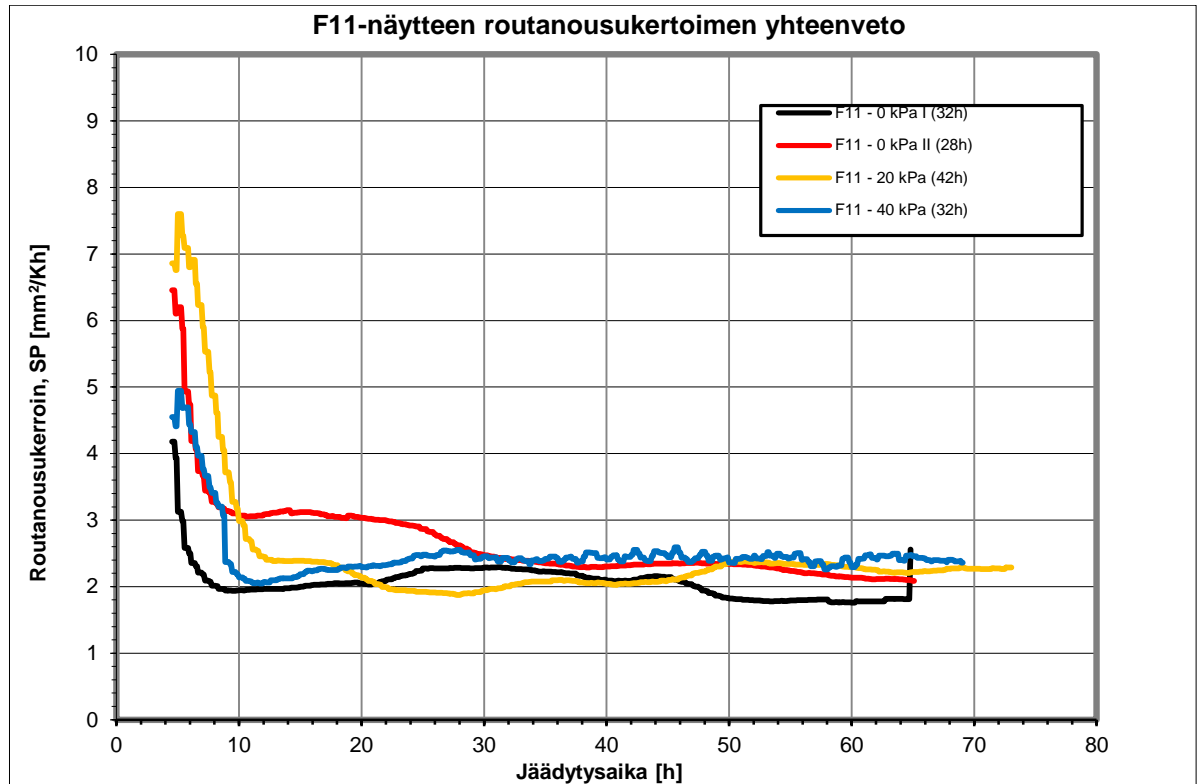
Kuva 5.7. Näytteen F11 routanousukokuvaaja, kuorma 2,45 kPa.

Taulukko 5.4. Näytteen F11 routanousukertoimet eri kuormituksilla.

Näyte	Kuorma	yksikkö	SP (routanousukerroin)	yksikkö
F11	2,45 (I)	kPa	2,32	mm^2/Kh
F11	2,45 (II)	kPa	2,49	mm^2/Kh
F11	20	kPa	2,12	mm^2/Kh
F11	40	kPa	2,15	mm^2/Kh

Koesyklin muut routanousukoetulosteet löytyvät liitteestä 4. Kuvassa 5.8 on esitetty näytteen routanousukertoimien yhteenveto. Routanousukertoimet eri kuormituksilla on esitetty taulukossa 5.4. Näiden perusteella voidaan sanoa, että aikaisemmasta poiketen kuorman ja routanousukertoimen välillä ei tässä yhteydessä havaita korrelaationsuhdetta.

Kuvassa 5.9 on näyte F11 esitetty jäätyneenä routanousukokeiden jälkeen. Kuvauksen yhteydessä näytteessä havaittiin kaksi jäälinsimuodostumaa. Ensimmäinen jäälinsirakenne sijaitsi näytteen yläpinnasta lukien tasolla -15 mm ja toinen -65 mm. Näytteen keskimääräinen korkeus kokeen jälkeen oli 115,2 mm.



Kuva 5.8. Näytteen F11 routanousukertoimen yhteenvetokuvaaja.



Kuva 5.9. Näyte F11 routanousukokeiden jälkeen.

5.3 Routanousukerroin (SP) kenttähavaintojen perusteella

Maakerrosten routanousukertoimet havaintojen perusteella määritettiin routanoususuhdetta kuvaavien kaavojen 35, 36 ja 37 avulla (Saarelainen 1999).

$$\varepsilon_f = \frac{2SP_0}{k^2} + 0,09w_{vol} \quad (35)$$

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_0} \quad (36)$$

josta saadaan

$$SP = \frac{k^2}{2} \left(\frac{h}{z-z_0} - 0,09w_{vol} \right) \quad (37)$$

jossa	ε_f	on routanoususuhde, [-]
	SP_0	on routanousukerroin, [mm ² /Kh]
	k	on routaantumiskerroin, [mm/sqrt(Kh)]
	w_{vol}	on tilavuusvesipitoisuus, [-]
	h	on routanousu, [mm]
	z	on routan syvyys, [mm]
	z_0	on päällyrakenteen paksuus, [mm]

Periaatteena oli valita havaintoväli ja tarkastella havaintovälillä tapahtunutta roudan syvyyden ja routanousun muutosta. Laskelmissa käytetyt havaintovälit valittiin niin, että routanousua ja roudan syvyyden muutosta tapahtui ainoastaan yhdessä maakerroksessa. Näin voidaan ajatella, että laskelma kuvastaa kyseisen maakerroksen routanousukerrointa. Kuvassa 5.10 on esitetty yhteenveto maakerrosten routanousukertoimen arviosta havaintojen perusteella.

Esimerkiksi ensimmäisen routivan kerroksen (0,2-0,5 m) osalta roudan syvyyden muuttuessa 0,38 m:stä 0,48 m:iin maanpinnasta, havaittiin routanousua keskimäärin 13 mm. Laskelmassa käytettiin päällysrakenteen paksuutena 380 mm ja roudan syvyytenä 480 mm. Laskelman perusteella ensimmäisen routivan kerroksen routanousukerroin on luokkaa $3,75 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Samaa periaatetta sovellettiin kahden muun maakerroksen routanousukertoimen määrittämiseen. Maakerrosten routaantumiskerroin (k) on määritetty maan lämpötekniikan parametrien perusteella lukuun ottamatta srHkMr-kerrosta. Tilavuusvesipitoisuus määritettiin laboratoriossa kuivairtitiheyden ja vesipitoisuuden avulla. Aiheeseen liittyen koekohteen havainnot on esitetty taulukossa 7.2 ja kuvassa 7.1.

Tekijä: Ilkka Tieaho

Aihe: Diplomityö

Luoma Yhteenvedo

"Routanousun ja roudan syvyyden mallintaminen Luoman koekohteessa"

Routanousukertoimien laskenta routanousuhavaintojen perusteella

$$(1) \varepsilon_f = 2SP/k^2 + 0,09 \cdot W_{vol}$$

$$(2) \varepsilon_f = h/(z-z_o)$$

$$SP = k^2/2 \cdot (h/(z-z_o) - 0,09 \cdot W_{vol})$$

Maalaji/kerros srHkMr/0,2-0,5m

	Arvo
Pw	1000,00
Pd	2140,00
Zo	380,00
Z	480,00
h	13,00
ε_f	0,13
k	8,00
W	0,07
Wvol	0,14

SP 3,75

Syvyys(mm)	rp1	rp2	rp3	Keskiarvo	
380,00	9,00	15,00	15,00	13,00	mm
480,00	21,00	29,00	28,00	26,00	mm
				13,00	delta h

Maalaji/kerros saSi/0,5-0,75m

	Arvo
Pw	1000,00
Pd	1420,26
Zo	480,00
Z	600,00
h	26,33
ε_f	0,22
k	9,40
W	0,27
Wvol	0,39

SP 8,16

Syvyys(mm)	rp1	rp2	rp3	Keskiarvo	
480,00	21,00	29,00	27,00	25,67	mm
600,00	43,00	56,00	57,00	52,00	mm
				26,33	delta h

Maalaji/kerros laSa/0,75-1,5m

	Arvo
Pw	1000,00
Pd	1216,70
Zo	970,00
Z	1170,00
h	28,00
ε_f	0,14
k	8,80
W	0,44
Wvol	0,54

SP 3,57

Syvyys(mm)	rp1	rp2	rp3	Keskiarvo	
970,00	96,00	119,00	106,00	107,00	mm
1170,00	124,00	143,00	138,00	135,00	mm
				28,00	delta h

Kuva 5.10. Routanousukerroin (SP) routanousuhavaintojen perusteella.

6 Routaan liittyvien ilmiöiden laskentamenetelmät

6.1 Käsinlaskenta

Käsinlaskennan avulla on mahdollista määrittää routaan liittyvien ilmiöiden suuruusluokkaa kohtuullisella tarkkuudella. Routanousua määritettiin osasummamenetelmällä (vrt. Kuva 7.3) ja roudan syvyyttä likimääräiskaavalla (Stefan 1891) ja osittaispakkasmäärämenetelmällä (Watzinger, Kindem & Michelsen 1938). Osittaispakkasmäärän kaavat on esitelty kaavoissa 16-24 ja roudan syvyyden likimääräismenetelmä kaavassa 25.

Käsinlaskennalla pystyttiin myös määrittämään hetkittäiset roudan syvyydet ja routanousu. Tämä mahdollisti roudan syvyyden ja routanousu kehityksen vertailun koekohteen havaintoihin. Roudan syvyyttä ja routanousua voidaan arvioida joko monikerroksisena tai yksikerroksisena. Routanousukerroin (SP) voidaan likimääräisesti määrittää joko kohteen havaintojen perusteella tai esimerkiksi kuvaajien avulla (RIL 261-2013).

6.2 Tietokoneohjelmat

6.2.1 SSR-malli

SSR-malli luotiin vuonna 1985, ja ensimmäisen kerran tätä ohjelmaa sovellettiin osaksi suunnittelua Kilpisjärvellä teiden suunnittelussa. Kokemusten perusteella ja Saarelaisen (1992) mukaan SSR-mallia voidaan käyttää onnistuneesti käytännön työkaluna infrarakenteiden suunnittelussa, kun halutaan kontrolloida routanousun määrää ja vähentää ilmiön haitallisia vaikutuksia rakenteisiin.

Laskennan parametreina ohjelmaan määritettiin maakerroksen paksuus, maa-ainesten kuivatiheys, -vesipitoisuus, -savipitoisuus, -kiintotiheys ja -routanousukerroin 0-kuormalla. Ohjelma laski tarvittavat lämpötekniset parametrit automaattisesti. Laskennansuorittajan oli myös mahdollista määrittää nämä parametrit. Ohjelman käyttämät lämpötekniset parametrit olivat jäätymislämpö ja jäätyneen sekä sulan tilan lämmönjohdavuus. Tässä työssä tehdyt laskelmat perustuivat laboratoriossa kokeellisesti määritettyihin lämpötekniisiin parametreihin.

Lisäksi ohjelmassa oli annettu erilaisia pakkasmääriä 5000-70000 Kh, ja näille esimerkiksi kertymiä. Tässä työssä SSR-mallissa käytetyt pakkasmäärät määritettiin tunnin välein mitattujen arvojen perusteella. Mallissa käytetty routanousukerroin tulisi määrittää routanousukokeen, routanousun ja roudan syvyyden havaintojen perusteella (takaisinlaskenta) tai likimääräiskaavoista. Likimääräisratkaisuja routanousukertoimelle on kattavasti esitetty RIL 261-2013 Routasuojaukset ohjeessa. Tässä työssä suoritetuissa laskelmissa routanousukertoimet määritettiin routanousukokeiden perusteella.

Laskennan tulokset esitettiin MS Excelin Tulos-välilehdellä. Tuloksissa on havainnollistettu routanousun ja roudansyvyyden kehitys sekä numeerisena että graafisena.

6.2.2 Temp/W

Temp/W:n toiminta perustuu elementtilaskenta-malliin (FEM, finite element method). Ohjelman avulla voidaan ratkaista ja mallintaa lämpötilan muutoksia maaperässä ympäristön, rakennusten tai esimerkiksi putkijohtojen vaikutuksesta. Temp/W:n monipuolinen muuttujien valikointi- ja määrittelyjärjestelmä mahdollistaa sekä yksinkertaisten että monimutkaisten lämpötilamallien ratkaisun. Tässä työssä Temp/W-mallista oli poistettu kaikki vertailua vaikeuttavat muuttujat. Ratkaisu laskettiin käyttämällä ainoastaan ilmastodataa ja maa-ainesten lämpöteknisiä parametreja, joten voidaan sanoa että tässä työssä käytetty laskentamalli on yksinkertaistettu malli todellisesta.

Temp/W:llä ei kyetty mallintamaan routanousua kohteessa. Temp/W:n käyttöohjeissa oli maininta, että vaikkakin ohjelmaa voidaan käyttää yhdessä Seep/W:n (pohjavesimalinnus-ohjelma) kanssa se ei kykene ratkaisemaan monimutkaisia ilmiöitä joihin liittyy vesi, jää, ilma ja maa-aines. Tämäkin suositus kuvastaa roudan ilmiöiden mallintamisen vaikeutta. Vaikkakin on olemassa hyväksytyjä periaatteita routailmiöille, kaikista ilmiöön vaikuttavista muuttujista ei ole päästy lopulliseen konsensukseen.

Kaikki Temp/W:n analyysit perustuvat oletukselle, että kosteuspitoisuus ei ratkaisun eri vaiheiden aikana muutu. Maa-aineksen ei täydy olla täysin kyllästynyttä, mutta kokonaiskosteuspitoisuuden katsotaan pysyvän vakiona.

Koska routanousun suora mallintaminen ei ollut Temp/W-ohjelmalla mahdollista, käytettiin routanousun arviointiin niin sanottua osasumma-menetelmää. Menetelmä on yksityiskohtaisemmin selostettu kappaleessa 7.4.1. Tällä menetelmällä voidaan laskea ohjelman antaman roudan syvyyden mukainen likimääräinen maakerroskohtainen routanousu, ja edelleen kokonaisroutanousu.

6.2.3 GB- Frost

GB-Frost on Geobitti Oy:n kehittämä laskentaohjelma infrakenteiden routaantumisen, routimisen ja sulamisen tarkasteluun. Ohjelma soveltuu erityisesti käytettäväksi teiden ja katujen suunnittelun yhteydessä. Ohjelman perusajatuksena on toimia työkaluna suunnittelijalle. GB-Frostin avulla voidaan nopeasti ja vaivattomasti tarkastella eri rakenneratkaisujen toimintaa routaantumisen ja routimisen yhteydessä.

GB-Frostin laskentaperusteena on 1-dimensionaalinen kerroksellinen lämmönsiirtyminen, johon on yhdistetty segregatiopotentiaali (SP(t)) routanousun laskemiseksi. Tässä työssä suoritetuissa laskelmissa käytettiin SP(t):n tilalla käytettiin routanousukerrointa (SP). Numeerisessa 1-d ratkaisussa ratkaisut perustuvat laskentamalliin, jossa maaprofiili on jaettu samanpituisiin elementteihin. Elementit on yhdistetty toisiinsa solmujen avulla, ja ohjelman lämmönsiirtoyhtälöiden numeerinen ratkaisu perustuu solmuintegrointimenetelmään.

Laskentamallissa käyttäjän tulee määrittää muun muassa rakenteen kerrospaksuudet ja –materiaalit sekä materiaaliparametrit ja pohjaveden asema. Materiaaliparametreilla tarkoitetaan lämmönjohtavuutta ja tilavuuslämpökapasiteettia. Maa-ainesten taulukkoarvoja on esitetty GB-Frost ohjelman yhteydessä. Nämä tiedot on koottu taulukoiksi Oulun kaupungille laaditun Katujen tyyppirakenteet-ohjeesta.

Lisäksi käyttäjän tulee määrittää pakkasmäärät. Se voidaan suorittaa yksinkertaisesti käyttämällä sijaintitietoja ja mitoittavaa todennäköisyyttä pakkasmäärälle. Pakkasummatiedot perustuvat 1961-1990 tilastoihin.

Ohjelmassa käytetyn segregatiopotentialin määrittäminen tulee perustua joko routanousukokeen tuloksiin tai routanousun- ja roudan syvyys havaintojen perusteella määritettyyn arvoon. Lisäksi segregatiopotentialia voidaan likimääräisesti arvioida vertailulaskelmissa esitettyjen maalaji- ja maaperätietojen avulla. Laskennan tulokset esitetään erillisessä raportti-ikkunassa graafisesti ja numeerisesti.

7 Tulokset

7.1 Yleistä tuloksista

Roudan mallinnus tietokoneohjelmilla vaatii tietoa ympäristöstä ja maa-aineksista. Lisäksi täytyy valita joitain perusolettamuksia, joilla kuvataan tilannetta ja mahdollisesti rajoitetaan tilanteeseen vaikuttavien muuttujien määrään. Tässä työssä mallintamiseen käytettiin hyvin pelkistettyjä malleja. Aina kun oli mahdollisuus, tarkasteltiin 1-dimensionaalista tilannetta.

Kaikkien eri laskentamenetelmien yhteydessä mallin reunaehtoina ja muuttujina käytettiin ilman- ($\Sigma F = \text{Pakkasmäärä, } K_h$) ja maaperän lämpötilatietoja sekä maa-ainesten parametreja. Työn tarkoituksena oli vertailla eri laskentaohjelmien laskemia arvioita käyttäen yksinkertaisia perusolettamuksia ja rajoitettua parametrien määrää.

Pidemmälle vietyä mallinnusta ja roudan ilmiöiden arviointia on mahdollista tehdä työssä esitetyillä ohjelmilla ja työkaluilla. Esimerkiksi Temp/W:llä olisi voinut useita erilaisia variaatioita roudan syvyyden arvioimiseksi. Tässä työssä pitkälle vietyjen mallien käytön ei katsottu palvelevan työn tarkoitusta ja tavoitteita.

Roudan mallinnusta varten luodussa perusmallissa maakerrosrajat määritettiin painokairausten ja koekuopan maakerroshavaintojen perusteella. Kohteen maalajit määritettiin laboratoriokokein kuivaseulonnalla, areometreillä ja muilla kappaleessa 4.3 esitetyillä menetelmillä ja kokeilla. Maa-ainesten lämpötekniiset parametrit määritettiin kappaleiden 2.4.2 ja 2.4.3 mukaisesti (Kersten 1952, Andersland & Andersson 1978). Lämpötekniisten parametrien määrittämiseksi aineiden vesipitoisuudet ($w\%$) ja kuivairto-heydet (ρ_d) määritettiin säähuoneessa suoritettujen routanousukokeiden yhteydessä.

Routanousun arvioinnin kannalta keskeinen routanousukerroin (SP) määritettiin laboratoriossa suoritettujen routanousukokeiden perusteella. Yhteenvetona voidaan mainita, että lähes kaikki mallinuksissa käytetyt parametrit määritettiin koekohteessa, laboratoriossa tai säähuoneessa tehtyjen kokeiden tai havaintojen perusteella. Taulukossa 7.1 on esitetty mallinnuksen kannalta keskeisimmät parametrit.

Taulukko 7.1. Routailmiöiden mallintamisen perusmalli ja tärkeimmät parametrit.

Maa-aines	Syvyys	λ_f	λ_u	λ_f	λ_u	C_{vf}	C_{vu}	C_{vf}	C_{vu}	w_{vol}	SP_0
SrMr	0-0,2m	164501,26	193191,49	1,90	2,24	1723025,21	1901121,21	478,62	528,09	0,10	0,00
srHkMr	0,2-0,5m	249696,00	243648,00	2,89	2,82	1864512,00	2116296,00	517,92	587,86	0,14	1,50
saSi	0,5-0,75m	156984,00	103680,00	1,82	1,20	1882008,00	2693700,00	522,78	748,25	0,39	8,50
laSa	0,75-1,5m	190329,00	90720,00	2,20	1,05	2032956,00	3146472,00	564,71	874,02	0,53	2,50
Yksikkö		[J/day*m°C]	[J/day*m°C]	[W/m°C]	[W/m°C]	[J/m ³ K]	[J/m ³ K]	[Wh/m ³ K]	[Wh/m ³ K]	[%]	[mm ² /Kh]

Jos roudan mallintamiseen käytetyllä ohjelmalla ei voitu arvioida routanousua, käytettiin routanousun määrittämiseen niin sanottua osasummamenettelyä. Menetelmä perustuu Saarelaisen (1999) esittämille routanoususuhteen kaavoille. Menetelmää käytettäessä täytyy tuntea routanousukerroin (SP), routaantumiskerroin (k) ja tilavuusvesipitoisuus (w_{vol}) ja maakerrosrajat. Maakerrosrajojen avulla voidaan luoda osasummamenetelmän monikerrosmalli. Lisäksi roudan syvyys tulee tuntea. Laskentaesimerkki on esitetty kappaleessa 7.3.

7.2 Luoman koekohteen havainnot – mallintamisen vertailudata

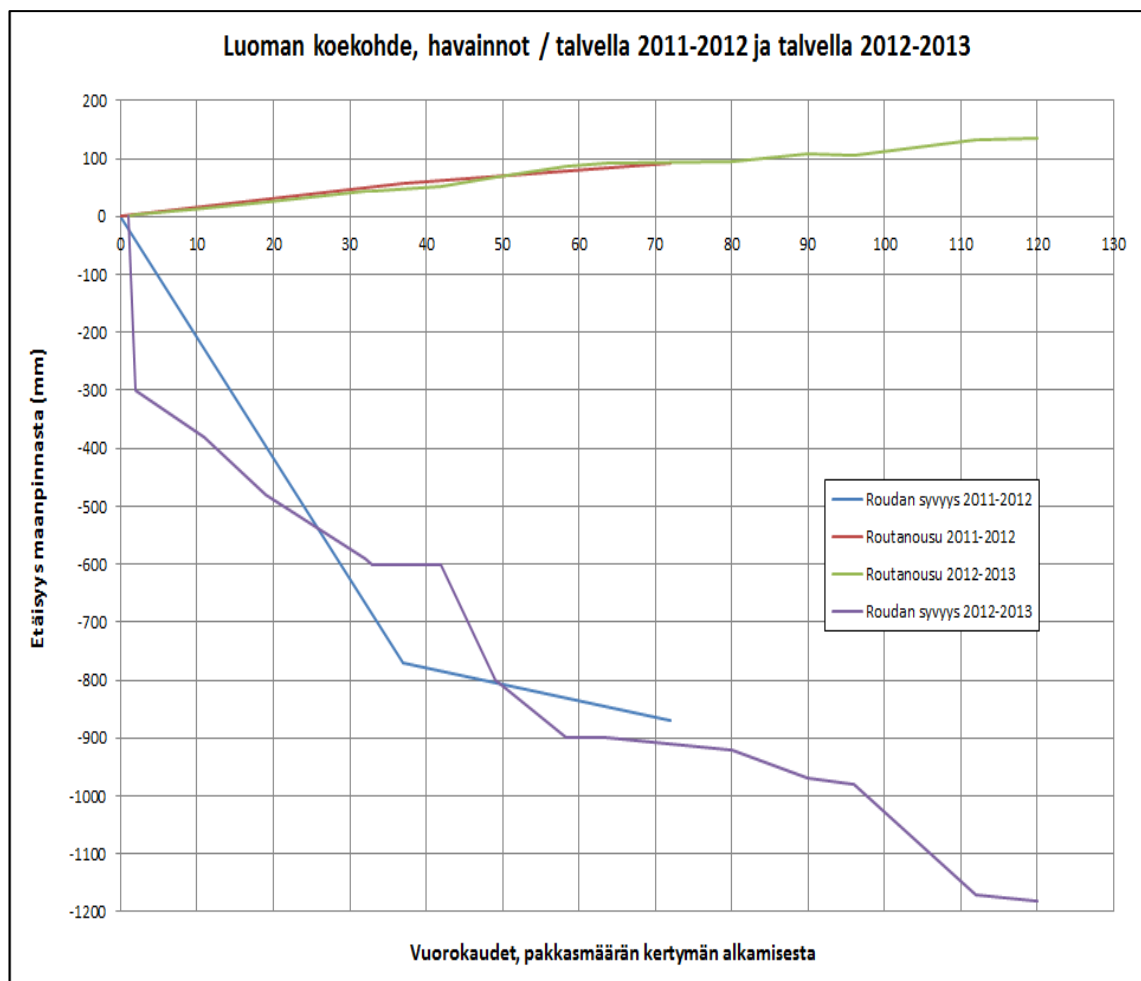
Edellä esitettyjä ohjelmistoja, rakenteita ja laitteistoja käyttäen koottiin roudan mallinnuksessa käytettävä vertailudata. Vertailudata koostui maaperän lämpötila-, ilman lämpötila- ja vaaitustiedoista. Toisin sanoen vertailudata luotiin koekohteen havaintojen perusteella.

Tunnin välein mitatut ilman lämpötilatiedot muutettiin päivän keskiarvoiksi ja edelleen koko talvikauden pakkasmääräksi. Ohjelmistojen avulla selvitettiin tietyinä ajankohtana tehtyä routanousumittausta vastaavat roudan syvyydet ja pakkasmääräkertymät.

Vertailudatan avulla tarkasteltiin, kuinka tarkasti erilaiset ohjelmat ja käsinlaskennan laskentamenetelmät ja likimääräiskaavat mallintavat todellista roudan syvyyttä ja routanousua. Taulukossa 7.2 on esitetty osa mallinnuksessa käytetystä vertailudatasta. Kuvasssa 7.1 on esitetty talvien 2011-2012 ja 2012-2013 roudan syvyyden ja routanousun kehitys pakkamäärän kertymän alkamisajankohdasta lähtien.

Taulukko 7.2. Luoman koekohteen havainnot talvilta 2011-2012 ja 2012-2013.

Pvm	Roudan ap	Roudan yp	RNP1(mm)	RNP2(mm)	RNP3(mm)	Ka (RNP)
6.2.2012	-770,00	0,00	62,00	57,00	55,00	58,00
12.3.2012	-870,00	0,00	100,00	90,00	88,00	92,67
5.4.2012	-820,00	-480,00	65,00	62,00	53,00	60,00
10.4.2012	-820,00	-580,00	55,00	50,00	43,00	49,33
22.4.2012	-780,00	-770,00	30,00	27,00	25,00	27,33
21.6.2012	0,00	0,00	5,00	0,00	-2,00	1,00
5.11.2012	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21.11.2012	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25.11.2012	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.12.2012	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.12.2012	-300,00	0,00	0,00	5,00	3,00	2,67
13.12.2012	-380,00	0,00	9,00	15,00	15,00	13,00
21.12.2012	-480,00	0,00	21,00	29,00	28,00	26,00
3.1.2013	-590,00	0,00	37,00	47,00	46,00	43,33
4.1.2013	-600,00	0,00	38,00	48,00	47,00	44,33
13.1.2013	-600,00	0,00	43,00	56,00	55,50	51,50
20.1.2013	-800,00	0,00	60,50	72,00	70,00	67,50
29.1.2013	-900,00	0,00	79,00	92,00	87,00	86,00
3.2.2013	-900,00	0,00	85,00	98,00	94,00	92,33
20.2.2013	-920,00	0,00	85,00	100,00	97,00	94,00
2.3.2013	-970,00	0,00	96,00	119,00	106,00	107,00
8.3.2013	-980,00	0,00	96,00	113,00	110,00	106,33
24.3.2013	-1170,00	0,00	124,00	137,00	133,00	131,33
1.4.2013	-1180,00	0,00	124,00	143,00	138,00	135,00
14.4.2013	-1180,00	-250,00	106,00	114,00	109,00	109,67



Kuva 7.1. Talvien 2011-2012 ja 2012-2013, routanousun- ja roudan syvyyden havainnot.

7.3 Routivuuden vertailu

Maa-ainesten routivuutta ja routanousukerrointa määritettiin laboratoriokokeiden (luokitussominaisuudet), routanousukokeiden (SP) ja koekohteen havaintojen mukaisesti taikaisinlaskennan perusteella. Taulukossa 7.3 on esitetty eri menetelmien ja routivuuskriteerien mukainen maa-ainesten routivuusluokittelu ISSMFE 1989a mukaan.

Soraisen hiekkamoreeni (srHkMr) kerroksen (0,2-0,5 m) routivuusluokitus vaihteli lievästi routivasta erittäin routivaan. Rakeisuuteen perustuvan routivuuskriteerin mukaan maa-aines oli yleisesti routivaa. Vaikkakin menetelmien välillä oli eroja routivuusluokituksessa, kaikkien määritysten mukaan maa-aines on routivaa.

Koekuopan ylemmän syvyyden saSi-kerroksen (0,5-0,75 m) maa-aines oli routivuuden eri määrittelykriteerien mukaan erittäin routivaa. Poikkeuksena oli juoksevuusluvun (I_L) mukaan määritetty routivuusluokitus. Rakeisuuden perusteella maa-aines oli routivaa. Riippumatta routivuuden määrittelymenetelmästä saadut tulokset osoittavat, että maa-aines oli routivaa ja todennäköisimmin erittäin routivaa.

Koekuopan alemman syvyyden laSa-kerroksen (0,75-1,4 m) maa-aines oli routivuuskriteeristä riippuen keskinkertaisesti routivaa tai erittäin routivaa. Ainostaan routanousukokeen perusteella maa-aines oli keskinkertaisesti routivaa. Muilla menetelmillä maa-aineksen routivuusluokitus oli erittäin routivaa. Rakeisuuden perusteella maa-aines oli

lievästi routivaa tai routivaa. Kaikkien työssä käytettyjen routivuuden määrittelymenetelmien mukaan maa-aines oli yleisesti routivaa materiaalia, ja todennäköisimmin erittäin routivaa.

Taulukko 7.3. Maa-ainesten routivuus ISSMFE 1989a mukaan.

Maa-aines ja routivuusluokitus	Plastisuusluku I_p ja juoksuraja w_L	Kapillaarisuus (m)	Hienousluku R_f	Juoksevuusluku I_L
srHkMr (0,2-0,5m) Routivuus	Na	2 Kohtalaisesti routivaa	NA	NA
saSi (0,5-0,75m) Routivuus	11,95/37,4 Erittäin routivaa	NA	39,47 Erittäin routivaa	0,218 Lievästi routivaa
laSa (0,75-1,4m) Routivuus	17/47,9 Erittäin routivaa	NA	93,95 Erittäin routivaa	1,27 Erittäin routivaa
Maa-aines ja routivuusluokitus	Routanousukerroin (mm^2/Kh), routanousukoe	Routanousukerroin (mm^2/Kh), takaisinlaskenta		
srHkMr (0,2-0,5m) Routivuus	1,5 Lievästi routivaa	3,75 Erittäin routivaa		
saSi (0,5-0,75m) Routivuus	8,5 Erittäin routivaa	8,16 Erittäin routivaa		
laSa (0,75-1,4m) Routivuus	2,5 Keskinkertaisesti routivaa	3,57 Erittäin routivaa		

7.4 Laskentamenetelmät routanousulle ja roudan syvyydelle

7.4.1 Käsinlaskenta

Tässä työssä roudan syvyyttä arvioitiin käsinlaskennalla Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin esittämällä menetelmällä (Watzinger, Kindem & Michelsen 1938), joka on esitetty kuvassa 7.2. Roudan syvyyden laskemiseen käytettiin niin sanottua osittaispakkasmäärän menetelmää. Lisäksi roudan syvyyden arviointi on laskettu likimääräiskaavan $z = k\sqrt{F}$ mukaan (Stefan 1891).

Laskelmissa käytetyt vesipitoisuudet ja kuivairtitiheydet määritettiin laboratoriokokein. Koekohteen vuoden keskilämpötila määritettiin Ilmatieteen laitoksen säähavaintojen perusteella. Säähavainnot ovat peräisin havainnointikaudelta 1977-2006. Vuoden keskilämpötila alueittain on esitetty RIL 261-2013 ohjeessa. Talvikauden keskilämpötila määritettiin talvella 2012-2013 Luomassa kerätystä ilman lämpötiladatasta. Talvikauden 2011-2012 keskilämpötilan oletettiin olevan sama kuin talvella 2012-2013. Lämpötekniset parametrit johdettiin kappaleen 2.4 mukaan.

Osittaispakkasmäärä menetelmän tuloksena roudan syvyydeksi saatiin talvella 2012-2013 1,11 m ja talvella 2011-2012 0,9 m. Likimääräiskaavan $z = k\sqrt{F}$ mukaan vastaavat arvot olivat 1,18 m ja 0,96 m. Koekohteen havaintojen perusteella roudan syvyys talvella 2011-2012 oli noin 0,87 m ja talvella 2012-2013 1,18 m.

Tuloksien perusteella huomataan, että käsinlaskennan kokonaisroudan syvyyden estimaattorit kuvastavat todellista tilannetta koekohteessa vähintäänkin kohtuullisesti. Käsinlaskennalla suoritettujen roudan syvyyden arvioiden ja koekohteen havaintojen välillä poikkeamat olivat 10 % luokkaa.

Roudan syvyys Luoman koekohteessa/osittaispakkasmäärämenetelmä

(Watzinger, Kindem & Michelsen 1938),

Yksikkö	%	kg/m ³	W/mK	°C	°C	Wh/m ³ K	Wh/m ³ K	Wh/m ³	paksuus(m)
Maalaji	w	ρ _d	λ _f	T _m	T _c	C _f	C _u	q	d
SrMr	0,0415	2050	1,91	5	-4,96	478,62	528,09	11739,4	0,2
srHkMr	0,0562	2140	2,89	5	-4,96	517,92	587,86	15408,67	0,3
saSi	0,273	1420,264	1,82	5	-4,96	522,78	748,25	41096,83	0,25
laSa	0,436	1220	2,2	5	-4,96	564,71	874,02	55239,14	0,8

$$d_n = -\lambda_n * \sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} + \sqrt{(\lambda_n^2 * (\sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k})^2 + \frac{2 * \lambda_n}{q_n} * F_n)}$$

$$F = F_n - \sum_{k=1}^{n-1} F_k$$

$$F_n = q_n * d_n * (\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n * 2})$$

$$q = C_u T_m + w \rho_d + 0,5 C_f |T_c|$$

jossa $\frac{d_n}{n}$ on kerroksen paksuus, m
kerroksen järjestysnumero

$$F_1 = q_1 * d_1^2 / \lambda_1$$

I) SrMr-kerroksen jäätymiseen tarvittavat pakkasmäärä:

F_1 245,8514 Kh

II) srHkMr-kerroksen jäätymiseen tarvittavat pakkasmäärä:

F_2 479,8546 Kh

III) saSi-kerroksen jäätymiseen tarvittavat pakkasmäärä:

F_3 1411,292 Kh

IV) laSa-kerroksen jäätymiseen tarvittavat pakkasmäärä:

F_4 16069,57 Kh

Summa $F_1 - F_4$ on 18215 Kh. Luoman kohteessa talven 2012-2013 pakkasmäärä oli 15468 Kh

Luomassa 15468 Kh

kerrokset 1-3 2136,998 Kh

kerros 4 13331 Kh

d_4 0,360851 m

$d_1 - d_3$ 0,75 m

d_{tot} 1,11 m

$$z_f = k * \sqrt{F}$$

Kun lasketaan likimääräiskaavalla

k-arvo 9,5

Z 1,18 m

Summa $F_1 - F_4$ on 18215 Kh. Luoman kohteessa talven 2011-2012 pakkasmäärä oli 10133 Kh

Luomassa 10133 Kh

kerrokset 1-3 2145,298 Kh

kerros 4 7987,702 Kh

d_4 0,151639 m

$d_1 - d_3$ 0,75 m

d_{tot} 0,90 m

$$z_f = k * \sqrt{F}$$

Kun lasketaan likimääräiskaavalla

k-arvo 9,5

Z 0,96 m

Kuva 7.2. Roudan syvyys Luomassa, käsinlaskennalla.

Kohde:	Luoma		$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09W_{vol}$ Saarelainen (1999)		$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_o}$
Tekijä:	Iti				
Pvä:	1.4.2013				
Itse täytettävät alueet					
Routimaton kerros	1	SrMr	0,2	mm	
	2			mm	
Routivat maakerrokset					
	SP₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)	
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3	
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25	
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8	
					1,35 m
Roudan YP (MP:stä)	0	m			
Roudan AP (MP:stä)	1,18	m			
1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,43
h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,04765 (m)
Htot(1,2,3)	122,48	mm			
Havaittu max	143,00	mm			
Havaittu min	124,00	mm			
Havaittu ka	135,00	mm			
Routanousupisteet(havainnot)	1	124	mm		
	2	143	mm		
	3	138	mm		
Ef	on	suhteellinen routanousu			
d	Maakerroksen jäänyt osuus (m)				
h	Maakerroskohtainen routanousu				

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kuva 7.3. Maakerrosten kokonaisroutanousu osasummamenetelmällä laskettuna talvel-
la 2012-2013. Laskennassa roudan syvyys on YP -0,0 m ja AP -1,18 m maanpinnasta.

Kuvassa 7.3 on esitetty maakerrosten kokonaisroutanousu osasummamenetelmällä las-
kettuna. Laskelmassa esitetyt routanousukertoimet olivat peräisin routanousukokeista.
Laskennan yhteydessä routanousukertoimena käytettiin SP₀-arvoa. Soraisen hiekkamo-
reenikerroksen routaantumiskertoimena (k) käytettiin tämän menetelmän yhteydessä
arvoa 8 [mm/(Kh)^{0,5}].

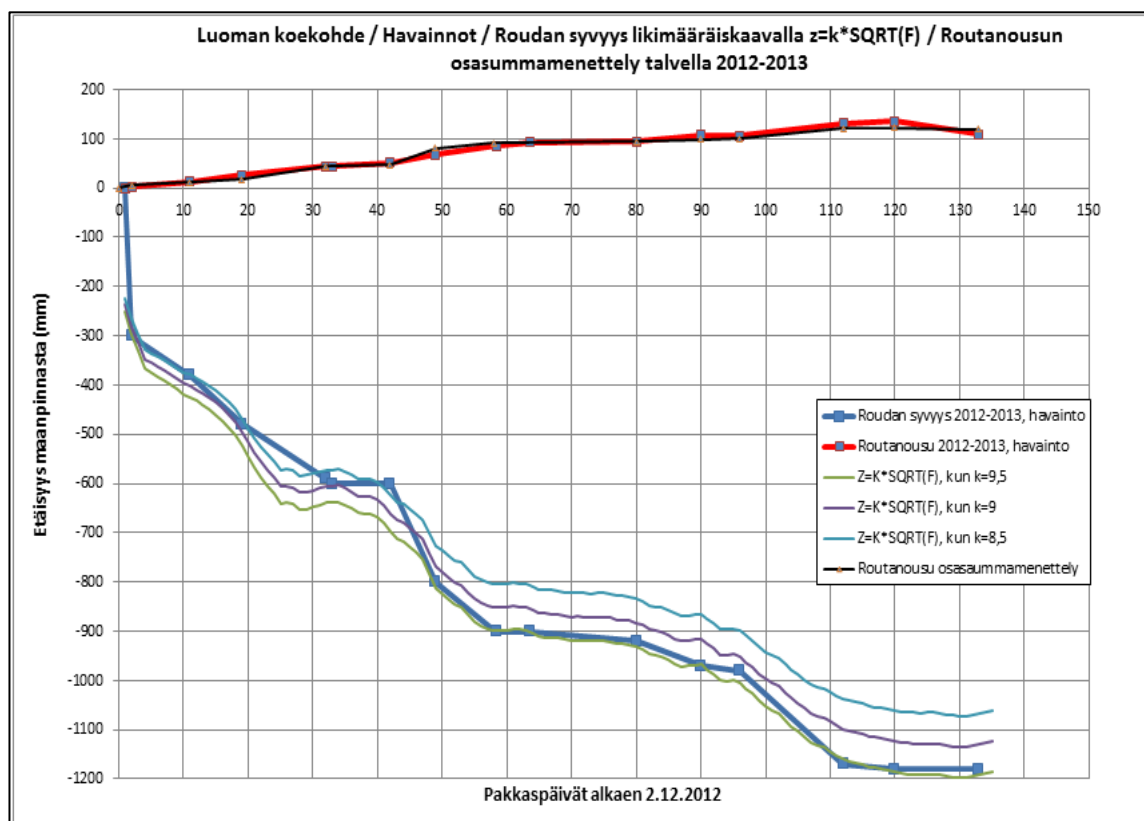
Perusteena osasummamenetelmälle oli kirjallisuudessa routanoususuhteelle esitetyt
kaavat (Saarelainen 1999). Kaavat on esitetty laskelman yhteydessä. Osasummamene-
telmässä laskettiin routanousu jokaiselle kerrokselle erikseen. Kokonaisroutanousu
Htot(1,2,3) saatiin summaamalla maakerroskohtaiset routanousut yhteen.

Kuvan 7.2 esimerkissä roudan syvyys oli havaintojen mukaan 1.4.2013 1,18 m maan-
pinnasta. SP- ja k-arvot määritettiin aiemmin esitetyllä tavalla. Kun tunnettiin roudan
kokonaissyvyys ja maakerrospaksuudet voitiin yksinkertaisesti määrittää kunkin maa-
kerroksen jäänyt osuus. Lisäksi kun tunnettiin routanoususuhte ja routivan maaker-
roksen paksuus voitiin laskea maakerroksen routanousu. Laskelmassa 1.4.2013 routa-
nousun kokonaismääräksi laskettiin osasummamenetelmällä 122 mm. Havaintojen pe-
rusteella routanousu oli keskimäärin 135 mm. Suurin routanousu havainto oli 143 mm

ja pienin 124 mm. Näin havaintojen ja osasummamenetelmän välinen virhe pysyi 10 %:n luokassa.

Kuvassa 7.4 esitetään Luoman koekohteen havaintojen ja käsinlaskennan tulosten yhteensopivuus. Kuvaajassa havainnot talvelta 2012-2013 ovat kuvattuna vahvemmallalla viivan paksuudella. Kuvaajan viivat koostuivat koekohteen havainnoista. Routanousumittauksia tehtiin pakkasmäärän kertymän alkamishetkestä läpi talven ja havaintoja pyrittiin keräämään viikon välein. Yhteensä pakkasmäärän laskennan aikaväliltä oli 16 routanousun havaintomittauksia.

Jokaisen routanousumittauksen aikana määritettiin myös sen hetkinen roudan syvyys maaperän lämpötilatiedoista. Likimääräisarvion ($z = k\sqrt{F}$) tiedot muodostettiin kuvaajaan ilman lämpötilatietoja hyväksikäyttäen. Kuvaajassa on laskettu roudan syvyys jokaisena päivänä pakkasmäärän kertymän aloitushetkestä sen lopetushetkeen. Lisäksi kuvaajassa on arvio roudan syvyydestä erilaisilla routaantumiskertoimilla (k).



Kuva 7.4. Kuvassa esitetään roudan syvyys likimääräiskaavalla ja routanousun kehittyminen osasummamenetelmällä talvella 2012-2013. Lisäksi kuvassa on koekohteen havainnot.

Kuten kuvasta 7.4 huomataan, että talvella 2012-2013 sekä roudan syvyyden että routanousun kehitystä pystyttiin arvioimaan osasummamenetelmällä ja roudan syvyyden likimääräiskaavalla onnistuneesti. Osasummamenetelmän laskelmat eri havaintohetkillä talvella 2011-2012 ja 2012-2013 on esitetty liitteessä 6.

Liitteessä 6 esitettyjen laskelmien perusteella vaikuttaisi siltä, että laskelmissa käytetty ensimmäisen ja kolmannen routivan maakerroksen routanousukerroin olisi ollut mahdollisesti liian alhainen. Tämä päätelmä tehtiin laskelmien 12/21.12.2012 ja 2/8/24.3.2013 perusteella. Kaikissa tapauksissa osasummamenetelmän arvio oli jäljessä

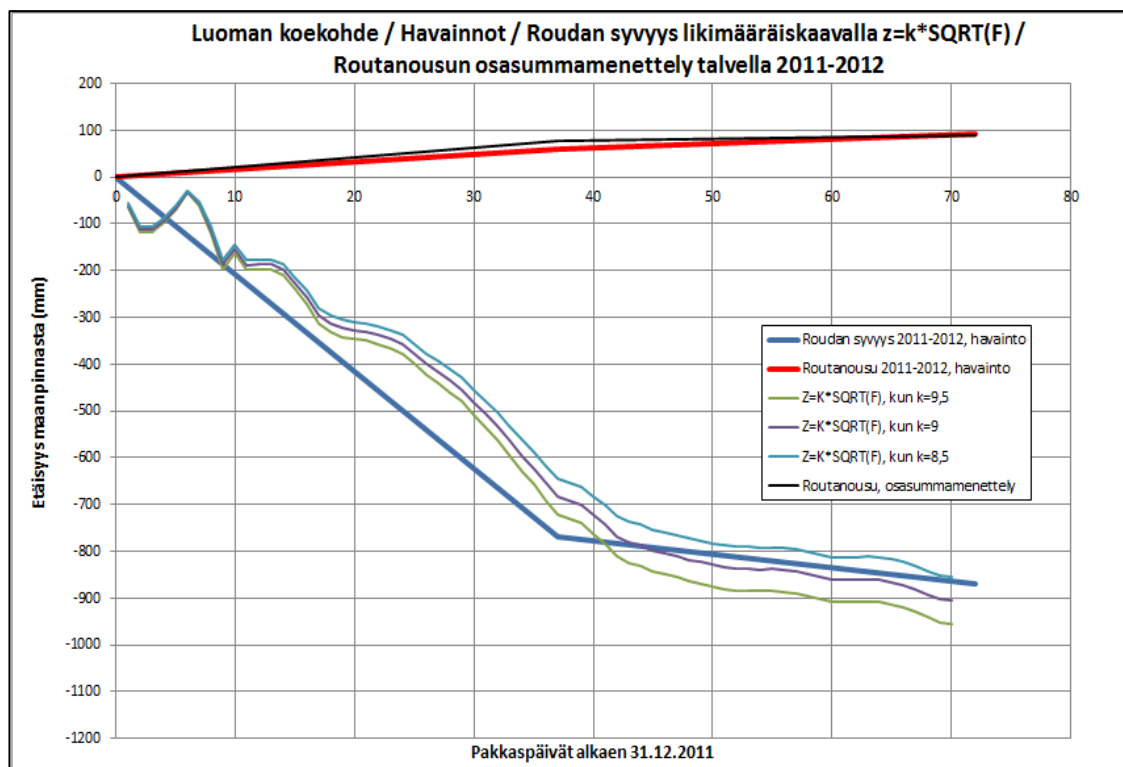
havaittua. Toisessa routivassa maakerroksessa tapahtuva routanousu korreloi hyvinkin tarkasti osasummamenetelmän antamien tulosten kanssa. Käytössä oli kuitenkin mahdollisesti hieman liian suuri routanousukerroin, koska menetelmän arviot olivat saavuttaneet koekohteessa havaitun routanousun roudan siirtyessä kolmanteen routivaan maakerrokseen. Tätä päätelmää tukee kappaleessa 7.3 esitetty, jossa taulukon 7.3 perusteella ensimmäisen ja kolmannen kerroksen routanousukerroin oli suurempi koekohteen havaintojen perusteella takaisinlaskentamenettelyllä laskettuna kuin routanousukokeen perusteella.

Lisäksi kuvasta 7.4 voidaan havaita, kuinka tarkasti roudan syvyyden likimääräiskaava ($z = k\sqrt{F}$) mallintaa roudan syvyyden kehitystä talvella 2012-2013 Luoman koekohteessa. Kuvan perusteella havaintoja parhaiten korreloivaan tilanteeseen päästiin, kun maakerrosten yhteisenä routaantumiskertoimen (k) käytettiin arvoa $9,5 \text{ mm}/(\text{Kh})^{0,5}$. Sama tilanne voidaan havaita kuvasta 7.2, jossa roudan lopullisen havaintosyvyyden ja likimääräisarvion välillä on alle 1 %:n poikkeama talvella 2012-2013.

Talvella 2011-2012 havaintomittauksia ei tehty yhtä usein kuin talvella 2012-2013. Talven 2011-2012 kuvaaja muodostettiin kolmen havainnon perusteella. Ilman lämpötilatiedot laskettiin Hki-Vantaan sääaseman mukaan Ilmatieteen laitoksen kuukausittaisista Ilmastokatsauksista. Maaperän roudan syvyydestä oli tietoja 6.2.2012 lähtien. Pakkamäärän kertymän laskenta aloitettiin 31.12.2011 ja tätä ajankohtaa käytettiin niin sanottuna ”nollamittauksena”. Tällöin katsottiin, että routanousu on 0 mm ja roudan syvyys on 0 m.

Vähäisistä havainnoista huolimatta kuvassa 7.5 esitetystä kuvaajasta voidaan havaita käsinlaskennan ja havaitun välille merkittävä korrelaatio. Vaikkakin kyseessä oli vähäinen määrä havaintopisteitä, niin lisättynä talven 2012-2013 tuloksiin saadaan työssä käytetyille menetelmille lisää vertailupohjaa.

Kuvan 7.5 perusteella osasummamenettely estimoii koekohteessa talvella 2011-2012 havaittua routanousua hyvin. Lisäksi roudan syvyyden arviointi likimääräiskaavalla onnistui vähintäänkin kohtuullisella tarkkuudella. Edelleen myös roudan ilmiöiden kehitystä arvioitiin käytössä olleilla laskentamenetelmillä onnistuneesti.



Kuva 7.5. Routan syvyys likimääräiskaavalla ja routanousun kehittyminen osasumma-menetelmällä talvella 2011-2012. Lisäksi kuvassa on koekohteen havainnot.

Esitettyjen kuvaajien perusteella huomataan, että sekä routan syvyyden arviointi likimääräiskaavalla ($z = k\sqrt{F}$) ja routanousun mallintaminen osasummamenetelmällä vaikuttivat korreloivan koekohteessa havaittuun hyvin tarkasti talvina 2011-2012 ja 2012-2013. Tässä yhteydessä voidaan sanoa, että poikkeamat havaitun ja ennustetun välillä ylittivät harvoin 15 %:a.

Tulosten yhteydessä on tärkeää muistaa, että routanousukokeista määritetyt routanousukertoimet edustivat vain hyvin pientä osaa routivasta maakerroksesta. Edelleen maakerrosrajojen eksakti määrittäminen ja sisällyttäminen malliin, on mahdotonta. Muita laskentaan vaikuttavia seikkoja ovat muun muassa laboratoriokokeiden tarkkuus laskentaparametrien määrittämisessä, lämpötilatietojen tulkinta routan syvyyden osalta ja vaaitus-tarkkuus. Edellä mainitun perusteella voidaan todeta, että routan ilmiöiden mallintaminen käsinlaskennalla oli **koekohteessa** erittäin onnistunutta.

7.4.2 SSR-malli

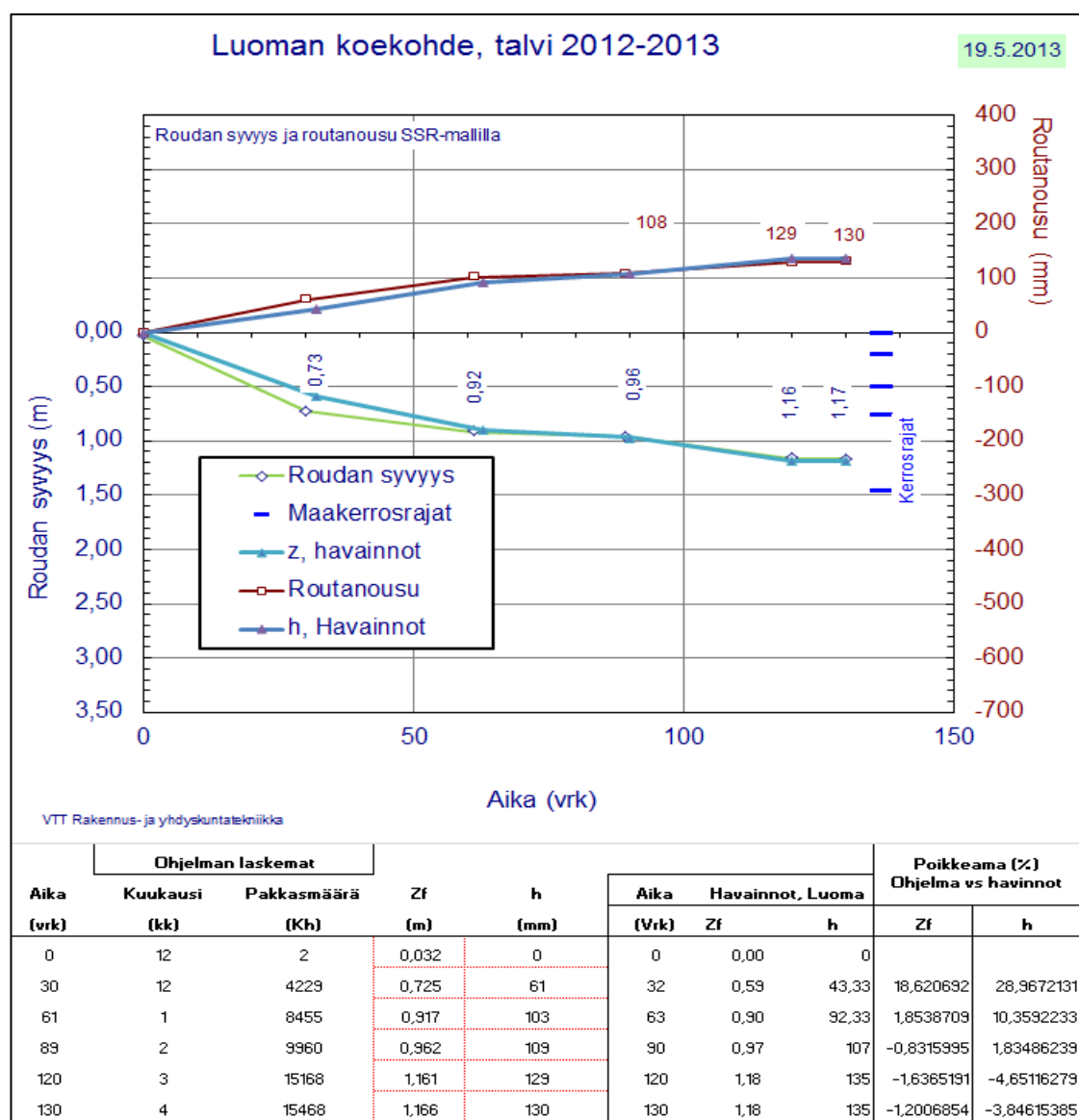
Kuvassa 7.6 on esitetty SSR-mallin ennusteet talven 2012-2013 routan syvyydelle ja routanousulle. Lisäksi laskentamalliin on lisätty koekohteen havainnot. Kuvan alareunassa on taulukko, josta voidaan havaita SSR-mallin laskeman ja koekohteen havainnon välinen poikkeama routan syvyydelle ja routanousulle.

Kun tarkasteltiin ohjelman antamia tuloksia ja havaintoja kohteesta huomattiin tuloksissa yhteensopivuus. Yhteensopivuus pätee sekä lopputuloksen että routanousun ja routan syvyyden kehityksen osalta.

Havaintojen perusteella, talvella 2012-2013 routa oli edennyt 0,59 m syvyyteen 32 päivän jälkeen. Ohjelman antaman tuloksen mukaan vastaava lukema oli 0,73 m 30 päivän jälkeen. Lisäksi koekohteen havainto ja ohjelman laskema routan syvyys kohtasivat

pienillä poikkeamilla 90 päivän kohdalla. Roudan loppusyvyydellä oli ohjelman laske-
man ja havaintojen välillä noin 15 mm:n poikkeama. Prosentteina ilmaistuna poik-
keamaa oli tulosten välillä noin 1,2 %.

Routanousun osalta ohjelman laskema routanousun kehitys ja lopputulos oli hyvin sa-
mankaltainen koekohteen havaintojen kanssa. 90 päivän, 120 päivän ja lopullisten rou-
tanousuarvojen vertailussa ei missään vaiheessa havaittu merkittävää poikkeamaa ha-
vaintojen ja ohjelman laskemien tulosten välillä. Tarkemmat tiedot poikkeamista on
esitetty kuvan 7.6 alareunan taulukossa. Poikkeamia arvioitaessa tulee huomioida, ettei
ohjelman laskemaa tulosta ja koekohteen havaintoa ole kaikissa tapauksissa määritetty
täysin samalla ajanhetkellä.



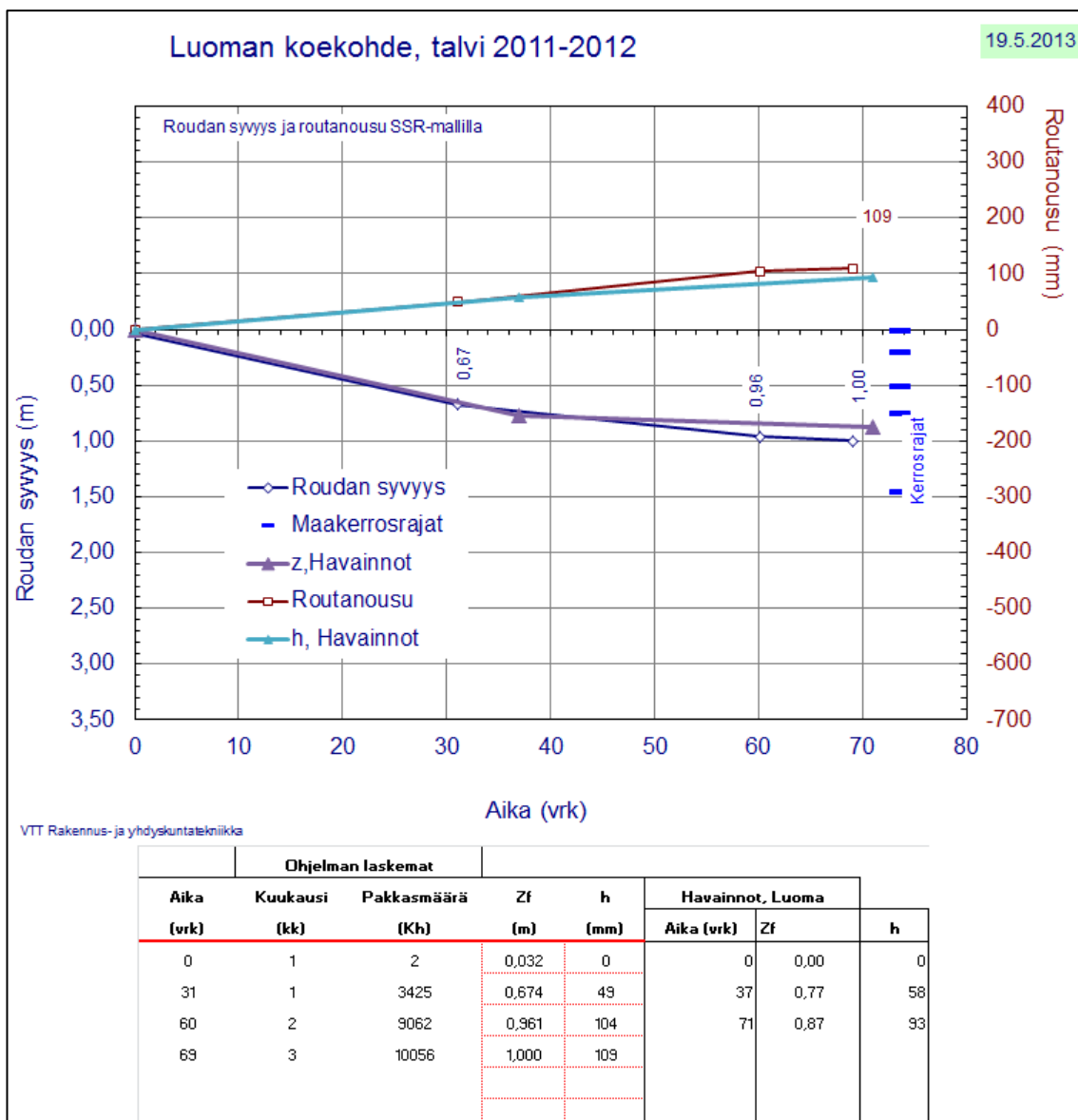
Kuva 7.6. SSR-malli, talvi 2012-2013.

Ohjelman laskemien roudan syvyyden ja routanousun arvioiden ja havaintojen välillä
oli talvella 2011-2012 hieman suurempia poikkeamia. Tässä yhteydessä on tärkeää
huomioida, että roudan syvyyden ja routanousun kehittymisen vertailua hankaloitti
tarkkailumittausten aloituspäivämäärä ja koekohteen havaintojen vähäinen määrä. Koe-
kohteesta oli maaperän lämpötilatietoja sekä routanousun havaintoja 6.2.2012 lähtien.

Niin sanottu ”nollatilanne” sijoitettiin pakkasmäärän kertymän laskemisen aloitusajan-kohtaan 31.12.2011. Tällä ajanhetkellä roudan syvyyden ja routanousun katsottiin olevan ”nollatasossa”.

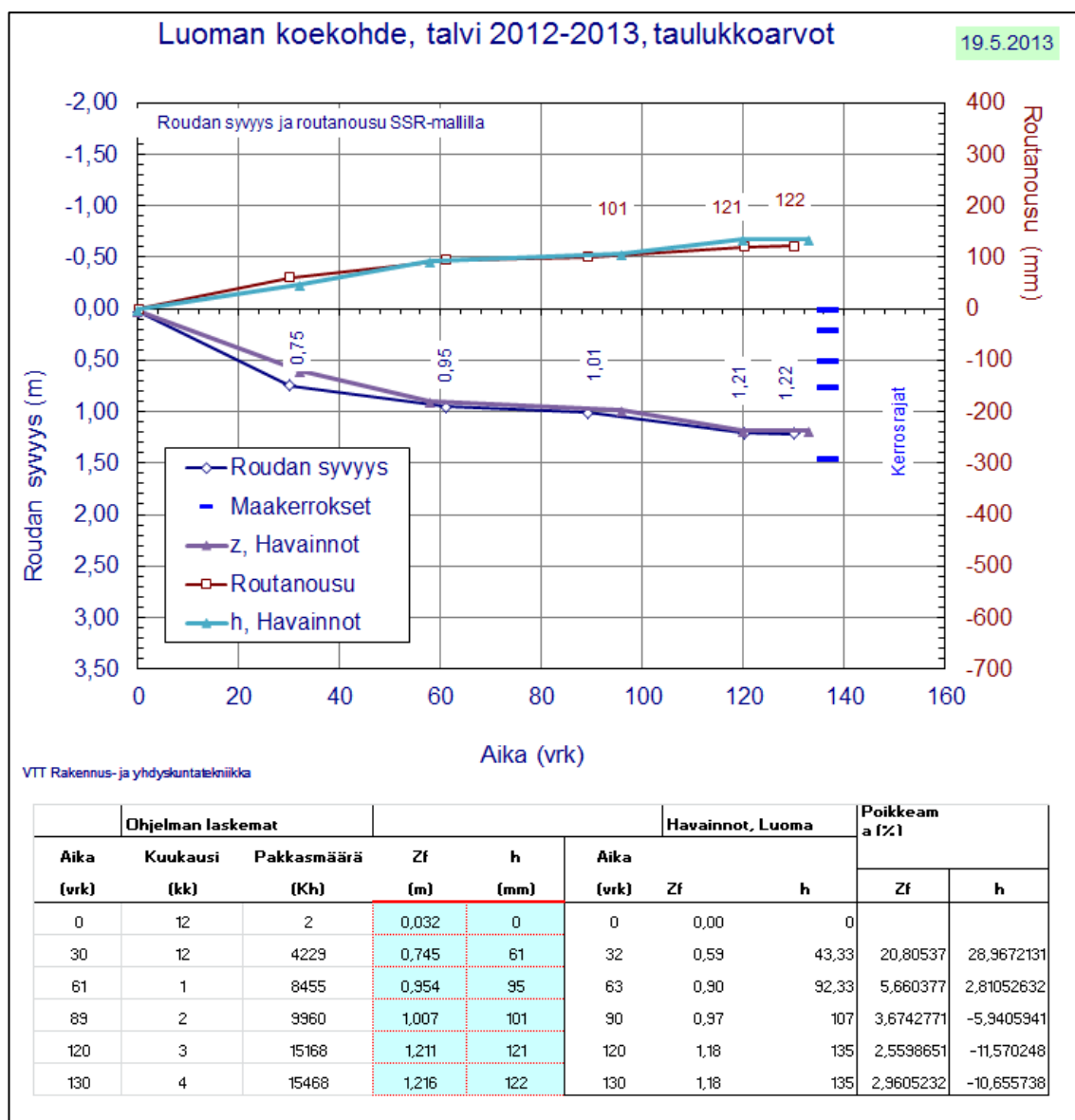
Ensimmäiset routanousu- ja roudan syvyyshavainnot sijoittuivat mallissa 37:n päivän kohdalle. Havaintojen perusteella tällöin routanousu oli 58 mm ja roudan syvyys 0,77m. 31 päivän kohdalla SSR-mallin mukaan roudan syvyys oli edennyt noin 0,68 m ja routanousun lasketaan olevan 49 mm.

Pakkasmäärän kertymän katsottiin loppuvan 9.3.2012. Tällöin ohjelman ennusteen mukaan routanousua oli 109mm ja vastaavasti roudan syvyys ajanhetkellä oli 1,00 m. Koe-kohteen havaintojen perusteella vastaavat arvot olivat noin 93 mm ja 0,87 m. Kuvan 7.7 ja edellä mainitun perusteella huomattiin, että ohjelma mallinsi kohtuullisella tarkkuudella talven 2011-2012 routanousua ja roudan syvyyttä.



Kuva 7.7. SSR-malli, talvi 2011-2012.

Kuvassa 7.8 on esitetty laskelma, jossa mallin laskentaan määritettävät maa-ainesten lämpötekniiset parametrit laskettiin ohjelman toimesta automaattisesti malliin. Ohjelma arvioi parametrit vesipitoisuuden ja kuivatiheyden perusteella. Laskelmissa havaitut poikkeamat koekohteen havainnon ja ohjelman laskeman välillä olivat pääsääntöisesti alle 10 %:n. Vertailulaskelmasta (kuva 7.8) voidaan päätellä, että *tässä kohteessa* routan syvyyden arviointi ja routanousu olisi voitu määrittää kohtuullisen tarkasti pienemmälläkin työpanoksella ”taulukkoarvoja” käyttäen ohjelman automaattisesti laskemia lämpötekniisiä parametreja (lämmönjohtavuus ja jäätymislämpö).



Kuva 7.8. SSR-malli, talvi 2012-2013, ”taulukkoarvoilla”.

Poikkeamien arvioinnin yhteydessä tulee ottaa huomioon aikaisemmin esitetyt epävarmuustekijät. Lisäksi voimakkaasti routivan kerroksen (saSi) paksuuden kasvaessa mallissa 50 mm, lisääntyy routanousun kokonaismäärä noin 10 % (talvella 2012-2013). Edellä mainittu on esimerkki siitä, kuinka herkkä malli oli keskeisten parametrien muutoksille. Tästä syystä on tärkeää olla huolellinen laskentaan merkittävimmin vaikuttavien tekijöiden määrittämisessä.

Edellä esitetyn perusteella roudan ilmiöihin keskeisesti vaikuttaneet seikat määriteltiin koekohteen laskelmissa onnistuneesti. Tämä tulee ilmi SSR-mallin tulokuvaajista ja taulukoista. Lisäksi voidaan havaita, että SSR-mallilla tehdyt laskelmat arvioivat roudan syvyyttä ja routanousua sekä näiden kehitystä talvina 2011-2012 ja 2012-2013 vähintäänkin kohtuullisella tarkkuudella.

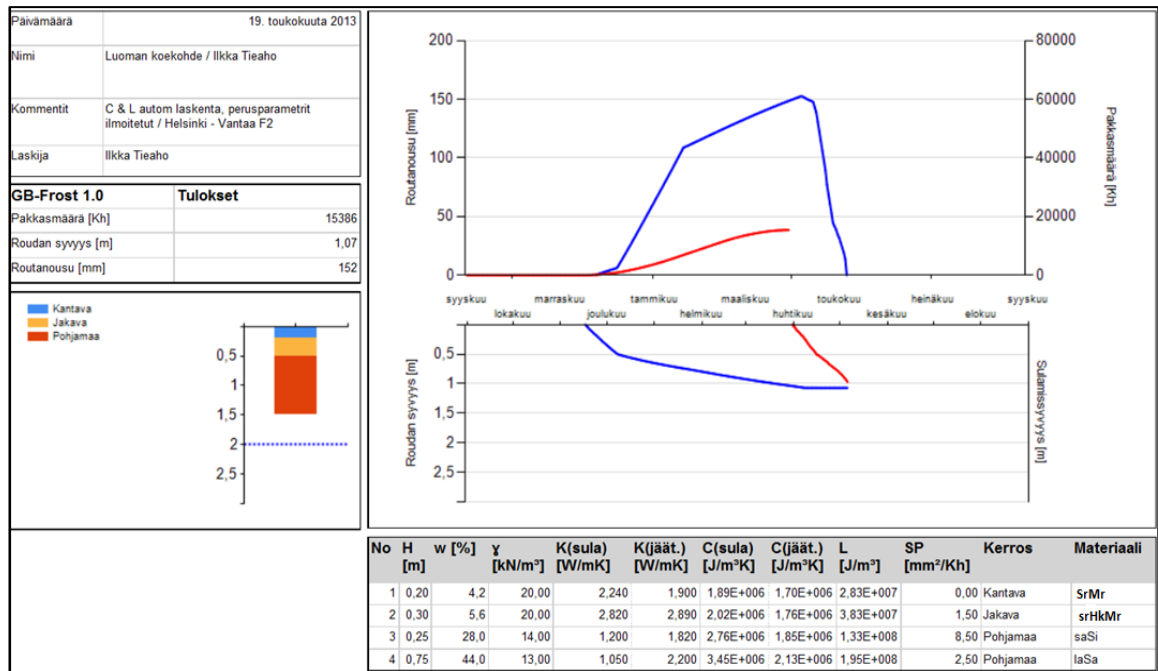
Kaiken kaikkiaan SSR-mallin käyttö oli yksinkertaista ja suoraviivaista. Laskennan tuloksena piirtyneet kuvaajat olivat havainnollistavia ja helposti ymmärrettäviä. Lisäksi vaihtoehdot esimerkiksi pakkasmäärän määrittelyn yhteydessä tekivät mallista käytännöllisen ja joustavan.

7.4.3 GB-Frost

GB-Frostilla talven pakkasmäärä määritettiin mitoittavan pakkasmäärän mukaan paikakuntakohtaisesti. Roudan syvyyden ja routanousun kehityksen arviointi ei olisi ollut edellä mainitun takia tarkoituksenmukaista. Tässä työssä vertailtiin roudan syvyyden ja routanousun lopullisia arvoja. Vertailu suoritettiin GB Frostin laskelmien ja koekohteen havaintojen perusteella.

Koekohteen pakkasmäärä oli talvella 2011-2012 10133 Kh ja ohjelmassa käytettiin Hangon normaalia pakkasmäärän kertymää (F_n), joka oli 10150 Kh. Talven 2012-2013 yhteydessä käytettiin kahden vuoden mitoittavaa pakkasmäärää (F_2) Hki-Vantaan lentoasemalla. Koekohteen pakkasmäärä oli talvella 2012-2013 15468 Kh ja ohjelmassa käytetty vastaavasti 15386 Kh.

Lämpötekniset parametrit määritettiin ohjelmaan sekä työn aikana tehtyjen lämpötekniisten parametrien laskennan perusteella että automaattisina ohjelman laskemina arvoina. Laskennan suorittamiseksi ohjelmaan määritettiin maa-ainesten vesipitoisuus, sulan- ja jäätyneen maan lämmönjohtavuus ja routanousukerroin. Automaattisina arvoina ohjelma määritteli sulan- ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetin (C) ja olomuodonmuutoslämmön (L). Lisäksi maa-ainesten tilavuuspainot määritettiin ”taulukkoarvojen” mukaan. Kuvassa 7.9 on esitetty GB-Frost laskentaohjelman arvio talven 2012-2013 roudan syvyydelle ja routanousulle. GB Frost-mallilla tehdyt laskelmat löytyvät myös liitteestä 7.

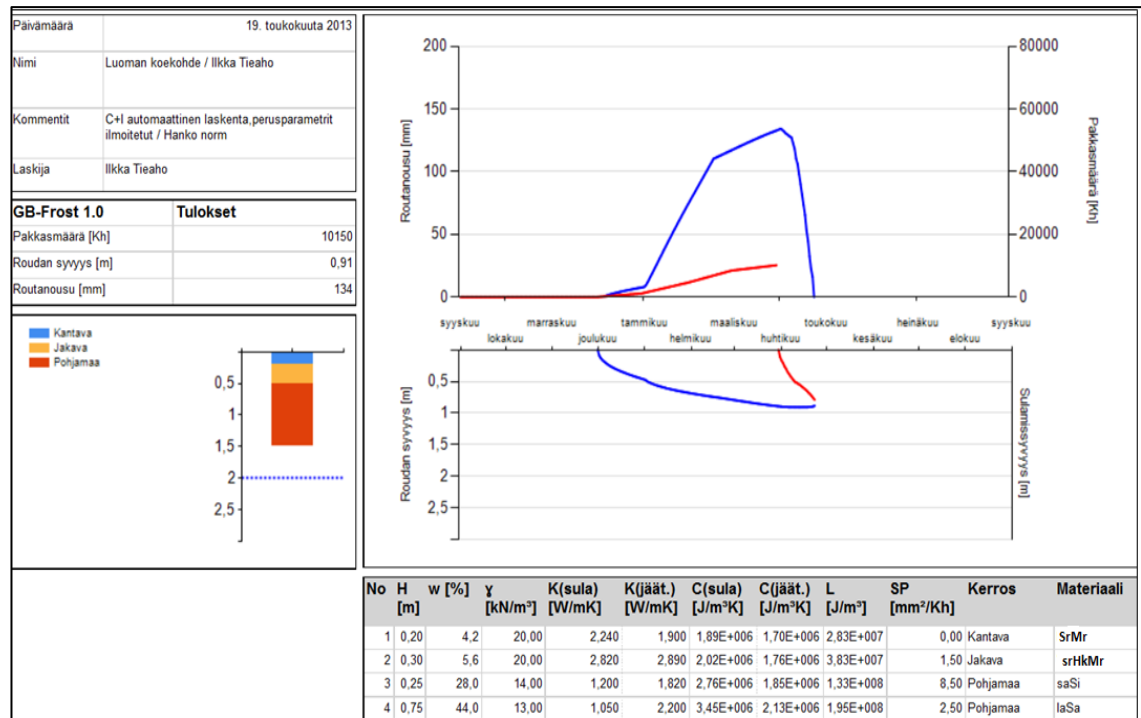


Kuva 7.9. GB-Frost, talvi 2012-2013.

Talville 2012-2013 tehdyssä laskelmassa ohjelma arvioi roudan lopulliseksi syvyydeksi 1,07 m ja routanousua ohjelma arvioi kertyvän 152 mm. Koekohteen vastaavat arvot olivat 1,18 m ja 135 mm. Näin ollen koekohteen havaintojen ja ohjelman laskeman poikkeamat olivat noin 10 % luokkaa.

Kuvassa 7.10 on esitetty laskentaohjelman ennuste talven 2011-2012 roudan syvyydelle ja routanousulle. Laskentaohjelman mukaan roudan syvyys asettui 0,91 m etäisyydelle maanpinnasta ja routanousua oli 134 mm. Koekohteen havaintojen perusteella, vastaavat arvot olivat 0,87 m ja 93 mm. Ohjelma arvioi roudan syvyyden lopullisen hyvin lähelle koekohteessa havaittua.

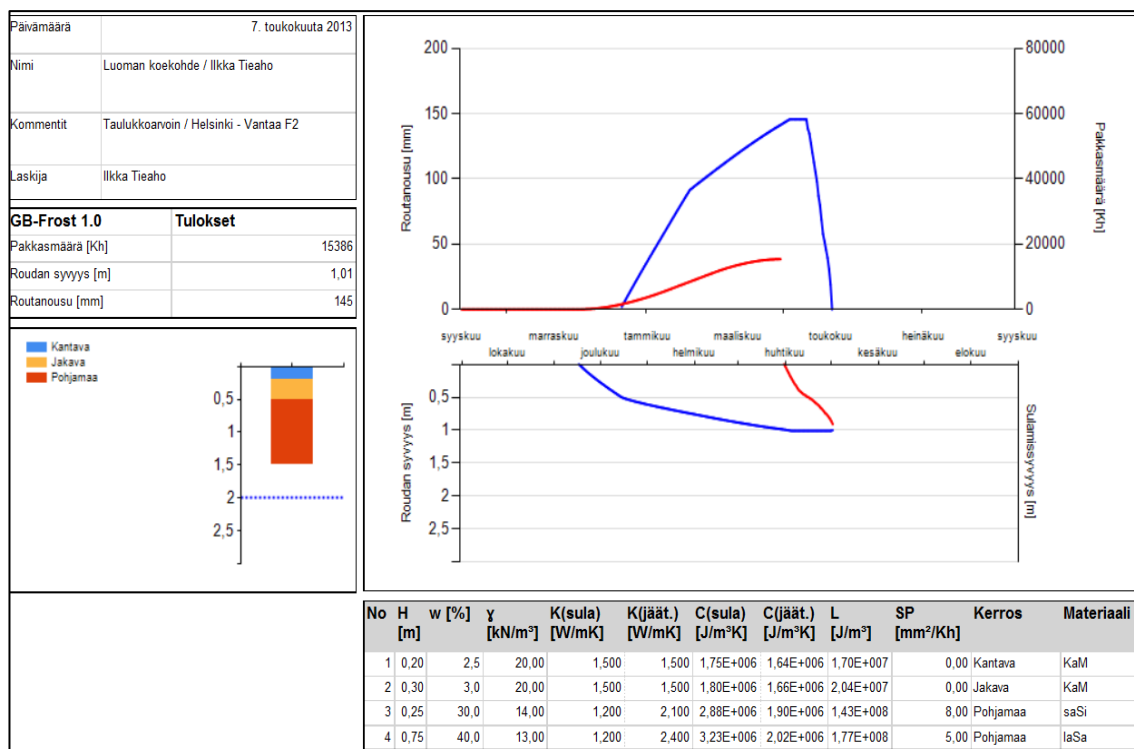
Huomioon ottaen laskelmiin vaikuttavat virhelähteet ja epävarmuustekijät voidaan arvioida, että laskentaohjelma mallinsi todellista tilannetta kohtuullisella tarkkuudella. Epävarmuustekijöillä ja virhelähteillä tarkoitetaan aiemmin tulosten poikkeamien yhteydessä käsiteltyjä asioita.



Kuva 7.10. GB-Frost, talvi 2011-2012.

Kuvassa 7.11 on esitetty GB-Frost laskentaohjelmalla tehty niin sanottu taulukkoarvo-laskenta. Tässä laskelmassa maa-ainesten laskentaparametrit määritettiin GB Frostissa esitettyjen taulukkoarvojen ja maakerrosmateriaalit koekohteen rakennussuunnitelman perustella (kuva 4.3). Taulukkoarvolaskelmassa routanousun ja roudan syvyyden arviointi laskettiin kohtuullisella tarkkuudella. Ohjelman laskeman roudan syvyyden arvion poikkeama koekohteen havaintoon oli noin 15 % ja routanousun vastaava 10 %.

Yhteenvedona kaikista GB-Frostilla tehdyistä laskelmista voidaan sanoa, että tulokset korreloivat kohtuullisen hyvin koekohteen havaintoihin. Poikkeamat pysyivät kaikissa laskentatapauksissa pääosin alle 15 %:n. Lisäksi, edellä esitettyä arvioitaessa tulee muistaa, että ohjelman pääperiaatteellinen toiminta ei ole roudan ilmiöiden mallintaminen ja estimointi havaitun mukaan. Ohjelma on kehitetty suunnittelijan työkaluksi.



Kuva 7.11. GB-Frost, talvi 2012-2013 taulukkoarvoin.

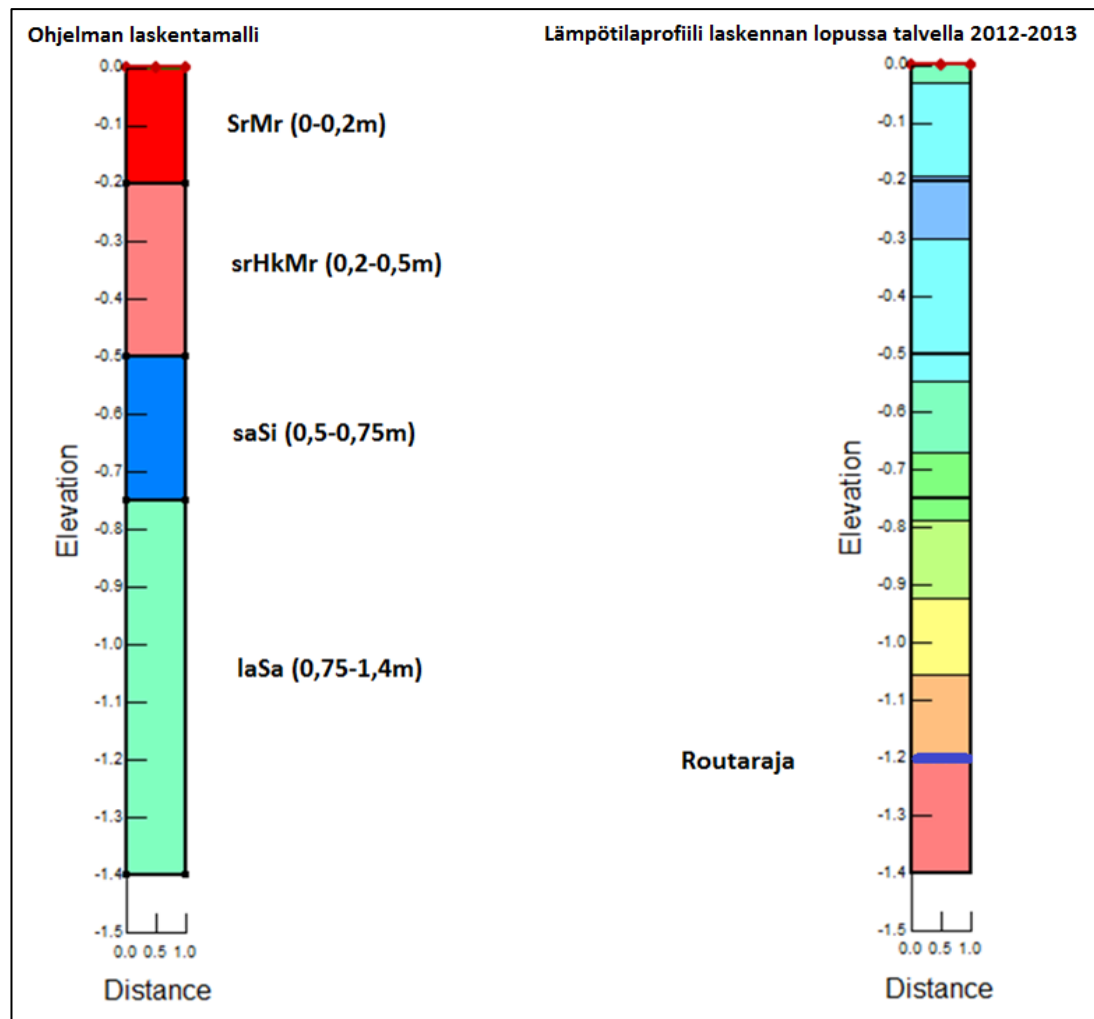
7.4.4 Temp/W

Temp/W laskentaohjelman käyttö poikkesi aiemmista ohjelmista hyvinkin paljon. Ensimmäinen kieli muuttui suomesta englanniksi ja laskentavalikot olivat todella kattavat. Tällä tarkoitetaan, että laskentaa voitiin suorittaa hyvin monen eri teorian pohjalta erilaisia perusolettamuksia käyttäen. Tämän perusteella malli voisi soveltua myös vaativimpien kohteiden suunnitteluun.

Tässä työssä pyrittiin minimoimaan tuntemattomat tekijät, joiden vaikutusta laskentaan ei voitu arvioida. Vaikkakin laskennassa käytettiin yksinkertaistettua mallia, voidaan arvioida, että kaikkea laskentaan vaikuttavia seikkoja ei osattu arvioida eikä tunnistaa.

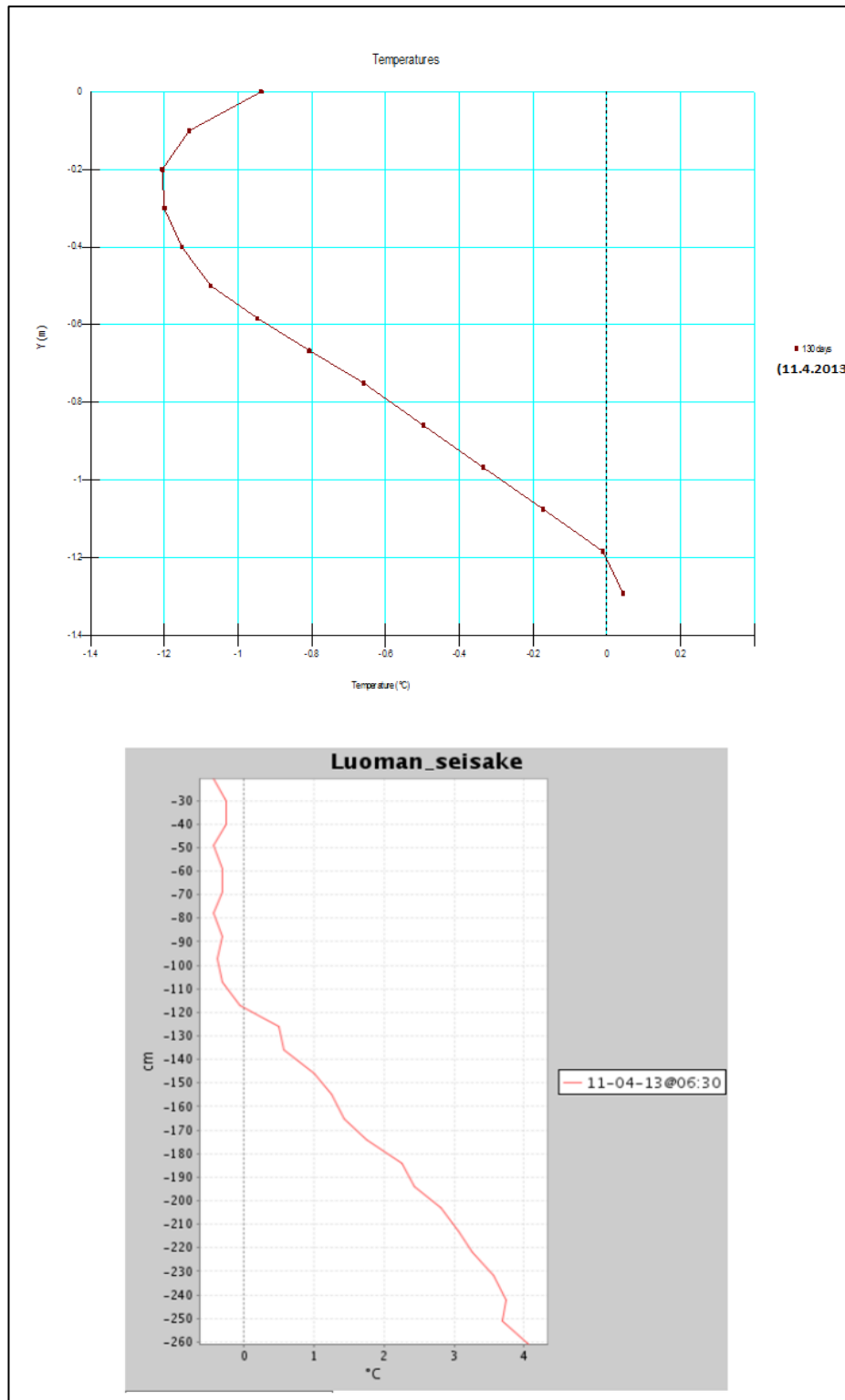
Kuvassa 7.12 on esitetty Temp/W ohjelmalla laskettu maan lämpötilaprofiili. Kuva havainnollistaa ohjelman laskemaa tilannetta talven 2012-2013 lopussa. Laskelmassa maanpinnan reunaehdoksi määritettiin talven 2012-2013 ilman lämpötilatiedot. Maaperän reuna- ja aloitusehtoina laskennassa käytettiin maaperän lämpötilatietoja laskennan aloitusajankohdalta, 2.12.2012. Lisäksi ohjelmaan määritettiin maan sula- ja jäätynyt lämmönjohtavuus sekä tilavuuslämpökapasiteetti ja tilavuusvesipitoisuus kappaleessa 7.1 esitetyn taulukon 7.1 mukaisesti.

Talven 2012-2013 laskenta suoritettiin ohjelmassa 0,1 m:n elementtiverkolla ja 6 laskenta-askelen määrällä. Tämä on mainittu, koska ohjelman laskema estimaatti roudan syvyydelle vaihteli aika-askelten määrästä riippuen suhteellisen voimakkaasti. Käytön aikana huomattiin myös, että iteroinnin sallittu poikkeama oli laskelmaan hyvin voimakkaasti vaikuttava tekijä.



Kuva 7.12. Temp/W:n laskenta talvelta 2012-2013

Aiemmin mainittuja laskentaparametreja ja reunaehtoja käyttäen roudan syvyydeksi saatiin talvella 2012-2013 noin 1,2 m maanpinnasta. Routarajaa kuvaa vahvistettu sininen viiva. Kuvan 7.12 lämpötilaprofiilissa värin vaihtuminen tarkoittaa 0,2 °C:n muutosta lämpötilassa. Näin ollen maanpinnan lämpötila on kuvassa -1,2 °C:n luokkaa. Kuvassa 7.13 on esitetty Finmeasin ja ohjelman määrittämät lämpötilat maaperän eri syvyyksillä. Kuvasta huomataan, että roudan syvyys oli hyvin yhteensopiva koekohteessa havaitun (Finmeas) ja Temp/W:llä lasketun perusteella.



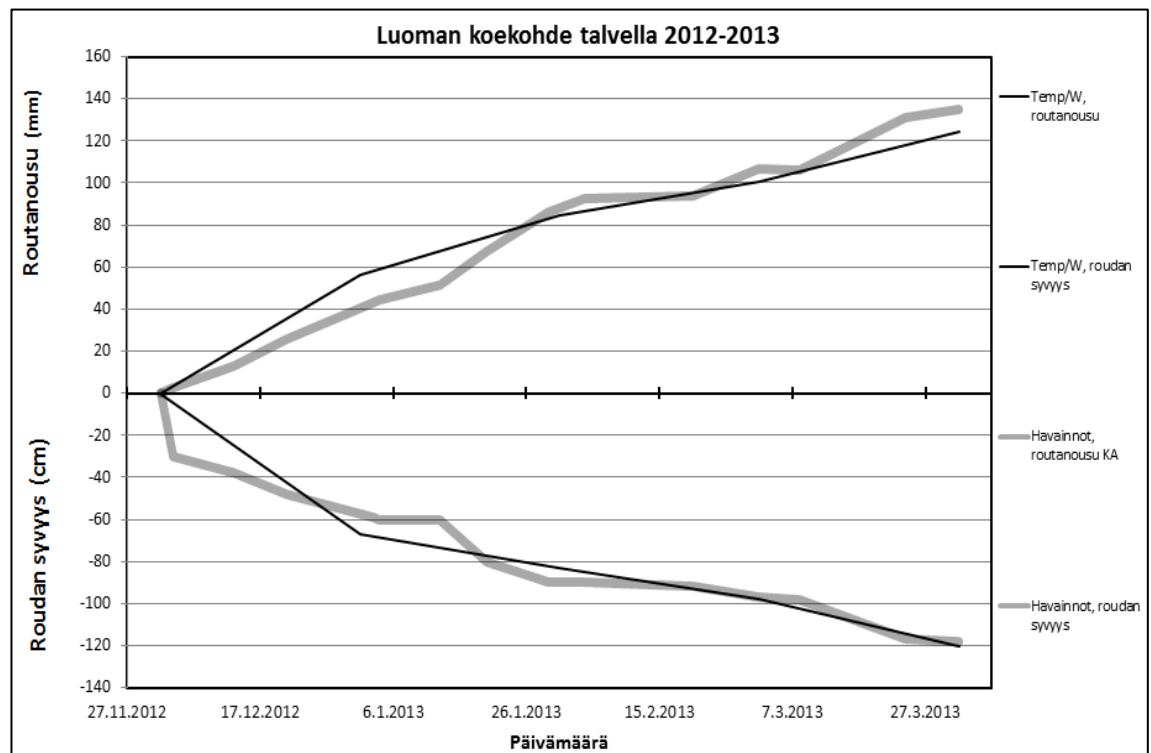
Kuva 7.13. Lämpötilat maaperässä, ylhäällä kuvassa Temp/W:llä mallinnettu ja alhaalla kuvassa Finmeas Oy:n mittaukset koekohteesta.

Temp/W-ohjelmalla ei voitu määrittää routanousua. Tästä syystä Temp/W-mallin routanousu laskettiin roudan syvyyden perusteella kappaleessa 7.3 esitetyn osasummamennetelmän mukaan. Routanousun laskentaan käytettiin aiemmin mainittuja parametreja, joten laskenta on identtinen kappaleessa 7.3 esitettyyn. Ainoa poikkeama oli roudan syvyys.

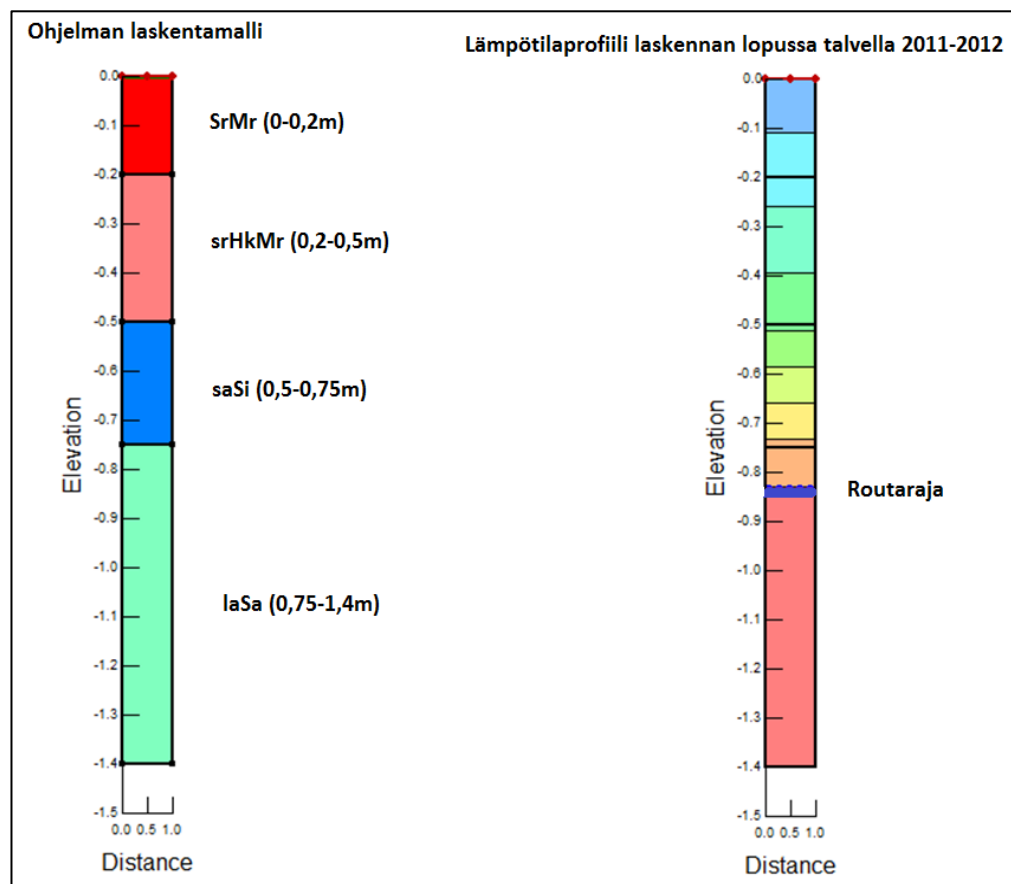
Osasummamenetelmällä laskettuna 1,2 m:n roudan syvyys vastasi 125 mm:n routanousua. Tämän perusteella käytetyt laskentamenetelmät estimoivat roudan syvyyttä kohtuullisen tarkasti koekohteen havaintoihin. Roudan syvyyden poikkeama on ainoastaan 2%:n luokkaan. Routanousun poikkeama on noin 10 %:n luokkaa. Routanousu osasummamenetelmällä talvella 2012-2013 Temp/W:llä lasketun roudan syvyyden mukaan on esitetty kuvassa 7.14. Muut talven 2012-2013 routanousulaskelmat roudan syvyyden mukaan on esitetty liitteessä 8. Kuvassa 7.15 on esitetty roudan syvyys ja routanousu ajanhetkittäin talvella 2012-2013. Kuvan perusteella Temp/W:llä suoritettut laskennat arvioivat koekohteen havaintoja ja roudan ilmiöiden kehitystä kohtuullisella tarkkuudella.

Kohde:	Luoma/TempW talvi 2012-2013		
Tekijä:	Iti		
Pvä:	1.4.2013		
Itse täytettävät alueet			
Routimaton kerros	1	SrMr	0,2 mm
	2		mm
Routivat maakerrokset			
	SP₀	k-arvo	Wvol
srHkMr	1,5	8	0,144
saSi	8,5	9,4	0,39
laSa	2,5	8,9	0,53
			1,35 m
Roudan YP (MP:stä)	0 m		
Roudan AP (MP:stä)	1,2 m		
1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m
Ef	0,059835	Ef	0,227495
d	0,3	d	0,25
h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)
3kerros	0,75-1,35m	Ef	0,11082
		d	0,45
h	0,04987 (m)		
Htot(1,2,3)	124,69 mm		
Havaittu max	143,00 mm		
Havaittu min	124,00 mm		
Havaittu ka	135,00 mm		
Routanousupisteet(havainnot)	1	124 mm	
	2	143 mm	
	3	138 mm	
Ef on	suhteellinen routanousu		d Maakerroksen jäänyt paksuus, roudan edetessä
Htot(1,2,3)	routanoususumma kerroksittain		
d	Maakerroksen jäänyt osuus (m)		h Maakerroskohtainen routanousu

Kuva 7.14. Routanousu Temp/W:llä lasketulle roudan syvyydelle osasummamenetelmällä talvella 2012-2013.



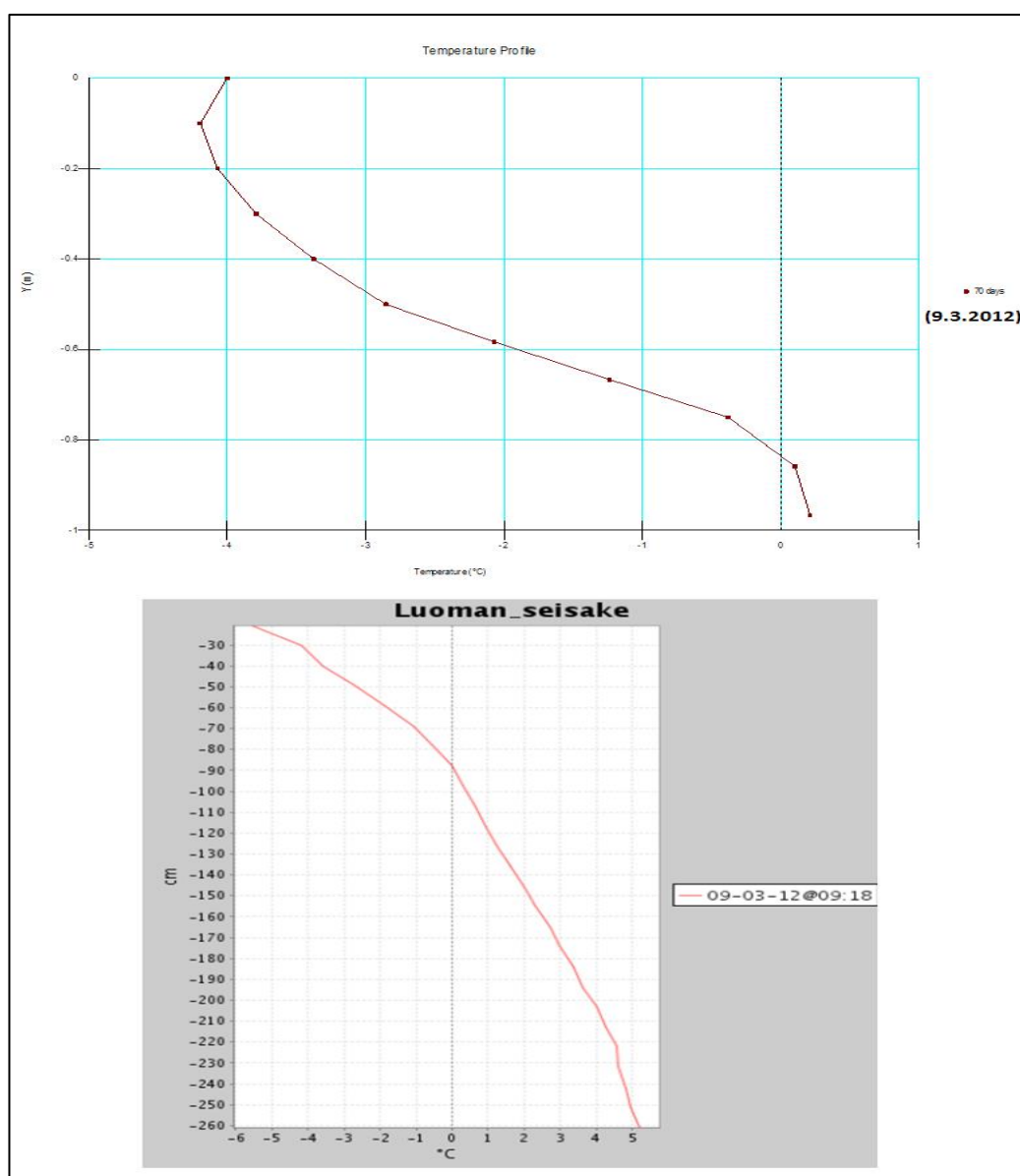
Kuva 7.15. Temp/W:llä suoritettut laskennat roudan syvyydelle ja tämän perusteella routanousu osasummamenetelmällä talvella 2012-2013.



Kuva 7.16. Laskenta Temp/W:llä talvelta 2011-2012.

Talven 2011-2012 laskenta suoritettiin myös kuudella laskenta-askeleella ja 0,1m:n elementtiverkolla. Pakkasmäärän kertymäpäiviä talvella 2011-2012 laskettiin olevan 70 ja kuvan 7.16 lämpötilaprofiili kuvastaa tilannetta 70 päivän jälkeen. Kuvan lämpötilaprofiilissa värin vaihtuminen tarkoittaa 0,5 °C:n muutosta lämpötilassa. Näin ollen maanpinnan lämpötila on kuvassa -4 °C:n luokkaa.

Kuvan 7.16 lämpötilaprofiilista keskimääräiseksi roudan syvyydeksi (sininen katkoviiva) määritettiin noin 0,84 m. Kuvasta 7.17 voidaan havaita, että sekä koekohteen havainnot (Finmeas) että Temp/W:n laskemat arvot roudan syvyydelle olivat hyvin yhteensopivat. Havaintojen ja laskennan välillä on alle 5 % poikkeama. Laskemalla routanousu Temp/W:n arvioiman roudan syvyyden perusteella saadaan kuvassa 7.18 esitetyn mukaisesti kokonaisroutanousuksi talvella 2011-2012 85 mm. Tämä arvo estimoiti tarkasti koekohteessa havaittua. Poikkeamaa lasketun ja havaitun routanousun välille muodostui alle 10 %.



Kuva 7.17. Lämpötilat maaperässä, ylhäällä kuvassa Temp/W:llä mallinnettu ja alhaalla kuva Finmeasin havainnoista koekohteesta.

Kohde: **Luoma/TempW talvi 2011-2012**

Tekijä: **Iti**

Pvä: **12.3.2012**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z - z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F} - z_o}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Roudan YP (MP:stä)	0 m
Roudan AP (MP:stä)	0,84 m

1kerros 0,2-0,5m

Ef	0,059835
d	0,3

2kerros 0,5-0,75m

Ef	0,227495
d	0,25

3kerros 0,75-1,35m

Ef	0,11082
d	0,09

h 0,017951 (m)

h 0,056874 (m)

h 0,00997 (m)

Htot(1,2,3)	84,80 mm
Havaittu max	100,00 mm
Havaittu min	88,00 mm
Havaittu ka	92,67 mm

Routanousupisteet(havainnot)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 5%;">1</td> <td style="width: 45%;">100</td> <td style="width: 50%;">mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>90</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>88</td> <td>mm</td> </tr> </table>	1	100	mm	2	90	mm	3	88	mm
1	100	mm								
2	90	mm								
3	88	mm								

Ef on suhteellinen routanousu

Htot(1,2,3) routanoususumma kerroksittain

d Maakerroksen jäätynyt osuus (m)

d Maakerroksen jäätynyt paksuus, roudan edetessä

h Maakerroskohtainen routanousu

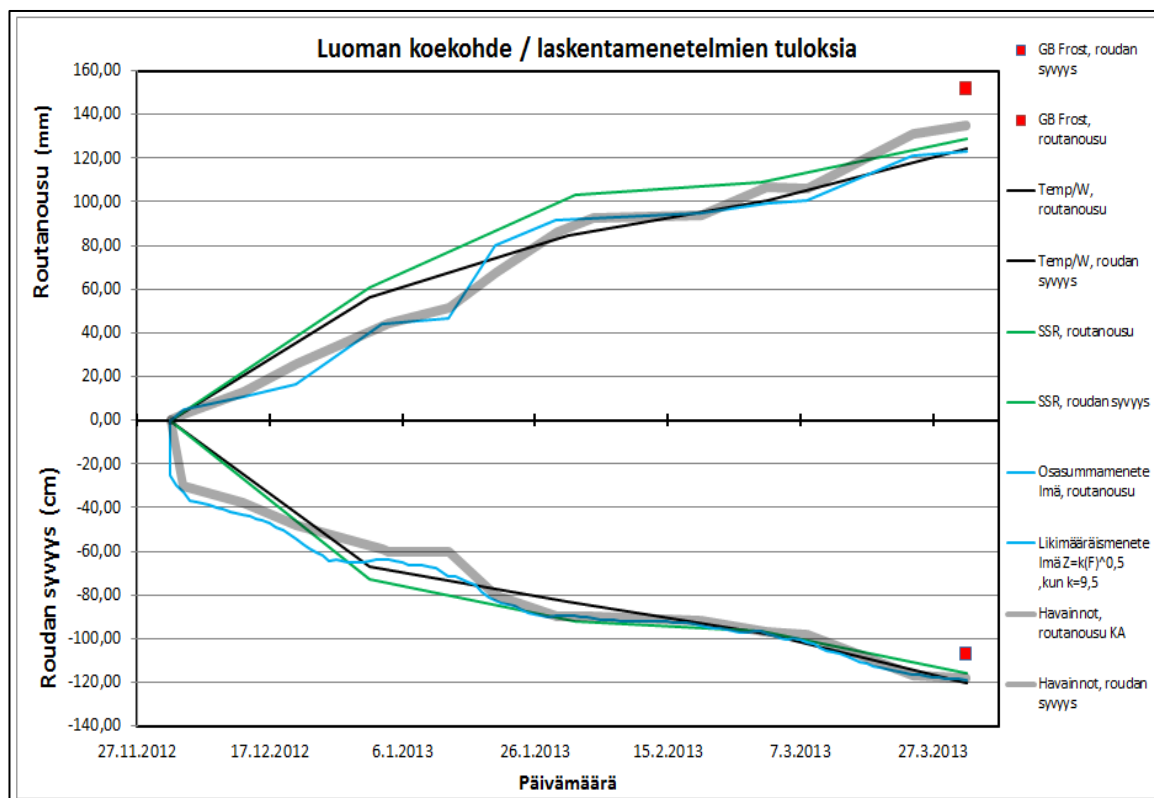
Kuva7.18. Routanousu Temp/W:llä lasketulle roudan syvyydelle osasummamenetelmällä talvella 2011-2012.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että Temp/W-ohjelma arvioi tietyillä oletuksilla tarkasti talvien 2011-2012 ja 2012-2013 roudan syvyyttä. Tämän jälkeen myös routanousun arvio osasummamenetelmällä korreloi kohtuullisen hyvin koekohteen havaintojen kanssa. Ohjelma on monitahoisempi ja vaikeampi käyttää kuin aiemmat laskentamenetelmät, mutta koetun perusteella oikein käytettynä se arvioi tarkasti maaperän lämpökäyttäytymistä. Tässä työssä tärkeimpiä ja laskentatuloksiin voimakkaasti vaikuttaneita tekijöitä maa-ainesten laskentaparametrien ja ilman lämpötilatietojen lisäksi olivat muun muassa

- sallittu poikkeama iteroinnissa (Tolerance of difference)
- laskentaelementtiverkon koko
- laskenta-askelien määrä
- laskenta-alueen koko ja iteroinnin määrä.

7.5 Eri laskentamenetelmien tulosten vertailua

Tämän työn tarkoituksena oli laskea roudan syvyyttä ja routanousua eri laskentamenetelmillä, ja vertailla näiden yhteensopivuutta koekohteen havaintoihin. Lisäksi työssä tarkasteltiin eri laskentamenetelmien tulosten keskinäistä korrelaatiota. Kuvassa 7.19 on koottu yhteenveto laskentamenetelmien arvioista roudan syvyydelle ja routanousulle ajanhetken mukaan.



Kuva 7.19. Eri laskentamenetelmien tuloksia talvella 2012-2013.

Kuvasta huomataan, että talven alussa roudan syvyyden arviot eri laskentamenetelmillä poikkeavat jossain määrin koekohteessa havaitusta. Tämän syynä voi olla se, että laskentamenetelmästä riippuen laskentatulosten määrä roudan syvyydelle vaihteli. SSR- ja Temp/W -mallin ensimmäiset arviot roudan syvyydelle on esitetty 30 päivän jälkeen laskennan aloituksesta eli 1.1.2013. Tällä ajanhetkellä poikkeamat olivat 15 %:n luokkaa, joten mallien voidaan katsoa arvioineen tilannetta kohtuullisella tarkkuudella. Roudan syvyyden likimääräiskaava ($z = k\sqrt{F}$, kun $k=9,5$) arvioi roudan syvyyttä koko talven ajalta hyvällä tarkkuudella. Vuoden 2013 osalta kaikki laskentamenetelmät arvioivat roudan syvyyttä hyvin tarkasti, mikä ilmenee eri laskentamenetelmien arvioiden päällekkäisyyksinä. Keväällä 2013 roudan syvyyden arviot eri laskentamenetelmillä pysyivät pääosin alle 10 %:n.

Routanousun suhteen voidaan sanoa, että laskentamenetelmien arviot koekohteen havaintoihin nähden olivat yhteensopivat. Riippumatta ajanhetkestä poikkeamat havaitun ja lasketun välillä olivat routanousun suhteen pääosin alle 20 %:n.

Parhaiten sekä routanousun että roudan syvyyden kehitystä arvioi käsinlaskennan likimääräiskaava (z) ja osasummamenetelmä (h) (Stefan 1891, Saarelainen 1999). Tämän voidaan arvioida johtuvan siitä, että käsinlaskennan menetelmissä oli muihin menetelmiin nähden huomattavasti enemmän laskentapisteitä.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että kaikki laskentamenetelmät kuvastivat koekohteen havaintoja hyvällä tarkkuudella. Lisäksi voidaan todeta, että laskentamenetelmien väliset tulokset eivät poikenneet toisistaan merkittävästi.

8 Johtopäätökset

Tämän työn tavoitteena oli tarkastella roudan syvyyttä ja routanousun suuruutta erilaisilla laskentamenetelmillä. Laskelmia verrattiin koekohteen havaintoihin. Lisäksi tarkasteltiin eri laskentamenetelmien tulosten keskinäistä yhteensopivuutta.

Työssä tehdyn perusteella voidaan päätellä seuraavaa:

1. Roudan mallinnuksen tulosten perusteella voidaan päätellä, että pohjatutkimukset, havaintomittaukset, routanousukokeet ja laboratoriokokeet on työn aikana tehty huolellisesti.
2. Routanousukertoimen määrittäminen routanousukokeen perusteella voi antaa todelliseen verrattuna pienempiä arvoja. Tämä ilmenee kappaleessa 7.2, kun routanousukertoimet ”takaisinlaskemalla” saavat suurempia arvoja kuin routanousukokeiden vastaavat. Tätä päätelmää tukevat aiemmat selvitykset ja tutkimukset aiheesta (Pesu 2010, Saarelainen 1992).
3. Riippuen käytettävästä routivuuskriteeristä sama maa-aines voi saada toisistaan poikkeavia routivuuden arvioita (kts. taulukko 7.3).
4. Työn perusteella voidaan todeta, että roudan syvyyden ja routanousun laskentaan soveltuvia mallinnusohjelmia oli saatavissa vähissä määrin.
5. Tässä koekohteessa GB Frostilla suoritettujen ”taulukkoarvo”-laskennan tulokset olivat yhteensopivat koekohteen havaintojen kanssa (vrt. kuva 7.11). Laskennan mallissa maakerrokset olivat määritetty koekohteen rakennussuunnitelman mukaan ja laskentaparametrit olivat peräisin ohjelman taulukoista.
6. Eri laskentamenetelmien väliset tulokset eivät poikenneet toisistaan merkittävästi.
7. SSR- ja TEMP/W- mallin sekä käsinlaskennan tulokset kuvasivat roudan syvyyden ja routanousun kehitystä merkittävän hyvin. Poikkeamat havaintojen ja laskennan välillä pysyivät pääosin alle 15 %:n.
8. Keskeisin päätelmä tämän työn perusteella oli se, että käytetyt laskentamenetelmät arvioivat koekohteen havaintoja hyvällä tarkkuudella.

Edellä esitetyn perusteella tälle työlle asetetut tavoitteet saavutettiin vähintäänkin kohtuullisesti. Jatkotutkimussuosituksiksi voitaisiin ajatella muun muassa seuraavia aiheita:

- Mitkä ovat routamitoituksen kannalta keskeisimmät esitiedot ja – kokeet joiden avulla voidaan päästä kohtuullisiin tarkkuuksiin roudan ilmiöiden arvioinnissa?
- Toimivatko menetelmät samalla tarkkuudella muissakin kohteissa? Jos toimivat, onko menetelmien käyttö täysin hyödynnetty osana suunnittelua?
- Kuinka nämä menettelytavat voidaan siirtää käytännön suunnittelun avuksi ja työkaluiksi? Onko suunnittelualalla tarvetta uusille menettelytavoille ja – vaihtoehdoille routamitoituksessa?

Lähdeluettelo

Andersland, O.B, Andersson D.M. 1978. Geotechnical engineering for cold regions. New York. 551s.

Andersland, Orlando B., Ladanyi, Branko. 1994. Frozen Ground Engineering. Chapman & Hall. 352s. ISBN 0-412-98201-3.

Bäcklund, J. 2013. Geotekninen monitorointi Suomessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto: Rakennustekniikka, Pohjarakennus ja maamekaniikka. Espoo. 94s.

CEN ISO/TS 17892-12:fi. 2004. *Geotekninen Tutkimus ja Koestus. Maan Laboratorio-kokeet. Osa 12: Konsistenssirajojen Määrittäminen. Attenbergin Rajat ja Sen Soveltaminen Suomessa*. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 15s.

Chamberlain, E. 1981. CRREL Monograph 81-2. Frost Susceptibility of soil. Review of index tests. 121s.

Hafeez, U. B. 1993. Factors influencing frost heaving of soils. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. Ss. 14-78.

Helander, R. 1986. *Maapohjan lämpötekniiset mitoituslaskelmat. Rotta maa- ja pohjarakentamisessa. RIL K 66-1986 (s.23-66)*. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL. 278s. ISBN 951-758-117-3

ISSMFE TC – 8a. 1989. Frost in geotechnical engineering. Vol. 1, VTT. Espoo. 438s. ISBN 951-38-3313-5

ISSMFE TC – 8b. 1989. Frost in geotechnical engineering. Vol. 2, VTT. Espoo. 507s. ISBN 951-38-3313-5

Kersten, M. S. 1952. Thermal properties of soils. Frost Action in Soils. Publication 213, s.161-166. Washington D.C: National academy of sciences – National research council.

Kersten, M.S. 1949. Thermal properties of soils. University of Minnesota, Engineering experiment station, Bulletin 28.

Konrad, J-M., Morgenstern, N. 1980. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal , 17 (4), s. 473-486

Konrad, J-M., Morgenstern, N. 1981. The segregation potential of freezing soil. Canadian Geotechnical Journal 1981, Vol.18, s. 482-491.

Koskinen, J. 1998. Tiedonkeruu ja käsittely routanousukokeessa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja maanmittausosasto. Espoo. 58s.

Kujala, K. 1994. Routanousun mallintaminen: Kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen tutkimuksia 2/1994. Oulu: Tielaitos, Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö. 135s.

Liikennevirasto. 2012. Tien geotekninen suunnittelu. Helsinki. 82s. ISBN 978-952-255-141-2

Nieminen, P. 1987. Routivuuden määrittäminen. *Routa ja rakentaminen, Geotekniikanpäivä 1986*.s 87-98.Mänttä: SGY ry.

Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd Og statens Vegvesens Utvalg. 1976. Frost i Jord. Nr 17. 400s. ISBN 82-7207-007-3.

Nurmikolu, A. 2005. *Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track*. Thesis for the degree of Doctor of Technology. Tampere University of Technology, Department of Civil Engineering. Tampere. 281s. Tampere. s. 85-90, 133-167. ISBN 952-15-1565-1

Onninen, H. 2001a. Routanousun ja painuman mittaus. Menetelmäkuvaus TPPT 14. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. 21s.

Onninen, H. 2001b. Routimiskertoimen (SP) määrittäminen laboratorioissa. Menetelmäkuvaus TPPT 6. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. 11s.

Osterkamp, T.E, Burn, C.R. 2003. Permafrost. Elsevier 2003. http://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter11/Ency_Atmos/Permafrost.pdf

Pesu, J. 2010. Routanousukokeen kehittäminen. Diplomityö. Aalto-yliopisto: Teknillinen korkeakoulu. Pohjarakennus ja maamekaniikka. Espoo. 70s.

Rieke, R., Vinson, T., Mageau, D., The Role of Specific Surface Area and Related Index Properties in the Frost Heave Susceptibility of Soils. 4th Int.Conf.of PF. 1983. s 1066-1071.

RIL 261-2013. 2013. Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 257s. ISBN 978-951-758-547-7

Saarelainen, S. 1986. *Maan routanousun arviointi. Routa maa- ja pohjarakentamisessa. RIL K 66-1986 (s.67-80)*. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL. 278s. ISBN 951-758-117-3.

Saarelainen, S. 1992. Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. The SSR model. Thesis for the degree of Doctor of Technology. Technical Research Centre of Finland, VTT, Road, Traffic and Geotechnical Laboratory. Espoo. 119s. ISBN 951-38-4073-5.

Saarelainen, S. 1999. Katujen routasuojaus. Työraportti koerakentamisesta 1995-1997.

Saarelainen, S. 2001. Routimiskertoimen määrittäminen. Menetelmäkuvaus TPPT 7. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. 13s.

SFS-EN ISO 13793. 2001. *Thermal performance of buildings. Thermal design of foundations to avoid frost heave*. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 49s.

Sikring mot telekader. Norges teknisknaturvetenskapelige forskningsråd og statens vegvesens utvalg fo frost i jirod, Rapport Nr. 17. <http://www.geir.be/FiJ/index.htm>

Slunga, E., Friberg, P., 1989. Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen. Teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan laitos. Espoo. 130s.

Soveri, J., Varjo, M. 1977. Roudan muodotumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955-1975. Vesitutkimuslaitoksen julkaisuja 20. 60s.

Stefan J. 1891. Über die Theorie der Eisbildung im Polarmeere. Ann. Phys. u. Chem., Neue Folge, Bd. 2, Heft 2s. 269-286.

Suomen geoteknillinen yhdistys ry (SGY). 1985. *GLO-85. Geotekniset laboratorio-kokeet : 1. Luokituskokeet*. Helsinki. Rakentajain Kustannus Oy. 107s. ISBN 951-676-308-1

Tie- ja vesirakennushallitus. 1970. Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita. osa II. Helsinki. Valtion painatuskeskus. 153s.

VTT Yhdyskuntatekniikka 1997. Talonrakennuksen routasuojausohjeet. Helsinki. Rakennustieto Oy. 94s. ISBN 951-682-454-4.

VTT Yhdyskuntatekniikka. 2007. Talonrakennuksen routasuojausohjeet. Toinen, uudistettu painos. Helsinki. Rakennustieto Oy. 96s. ISBN 978-951-682-851-3

Watzinger A., Kindem E. & Michelsen 1938. Undersøkelser av masseutskiftningsmaterialer for vei- og jernbanebygning. Oslo, Medd fra veidirektion 15.

Liiteluettelo

- Liite 1. Lämpötila-antureiden kalibrointi
- Liite 2. Routanousukokeet, F2-näyte
- Liite 3. Routanousukokeet, F6-näyte
- Liite 4. Routanousukokeet, F11-näyte
- Liite 5. Luoman ilman lämpötiladataa
- Liite 6. Routanousu käsinlaskennalla Luomassa (osasummamenetelmä)
- Liite 7. GB Frost-laskennat
- Liite 8. Temp/W- routanousulaskennat (osasummamenetelmä)

Liite 1. Lämpötila-antureiden kalibrointi

Lämpötila-anturit kalibroitiin tislattua jäävettä, lunta, syvää astiaa ja tarkkoja lämpötilamittareita hyväksi käyttäen. Koko prosessin ajan kalibrointijääveden ja lumen seoksen lämpötilaa tarkkailtiin laboratorio-olosuhteisiin tarkoitettulla lämpömittarilla ja sähköisellä tarkkuusmittarilla. Mittarit antoivat lämpötiloja °C kymmenyksen tarkkuudella. Missään vaiheessa kalibrointia lämpötilat eivät muuttuneet alle -0,2 °C:n tai yli +0,2 °C:n. Näin ollen pysyttiin ohjeessa määritetyllä kalibrointialueella.

Kalibroinnissa routaselli, kansi- sekä pohjaelementti kokonaisuudessaan upotettiin kalibrointinesteeseen. Nesteen lämpötilan katsottiin olevan ± 0 °C ja se muodostui tislatus- ta vedestä ja lumesta. Lämpötilojen mittaussyvyys nesteessä oli vähintään 150 mm ja astian pohjasta lukien 30 mm. Prosessin yhteydessä katsottiin, että kaikki lämpötila-anturit toimivat yhtä lukuun ottamatta niille tarkoitettulla tavalla. Yksi virheellinen anturi vaihdettiin ja prosessi tehtiin uudestaan. Jälkimmäisessä kalibroinnissa kaikki anturit antoivat hyväksyttäviä lämpötilan arvoja.



Liite 1. Kalibrointilaitteisto.

Kalibroinnin vaiheet:

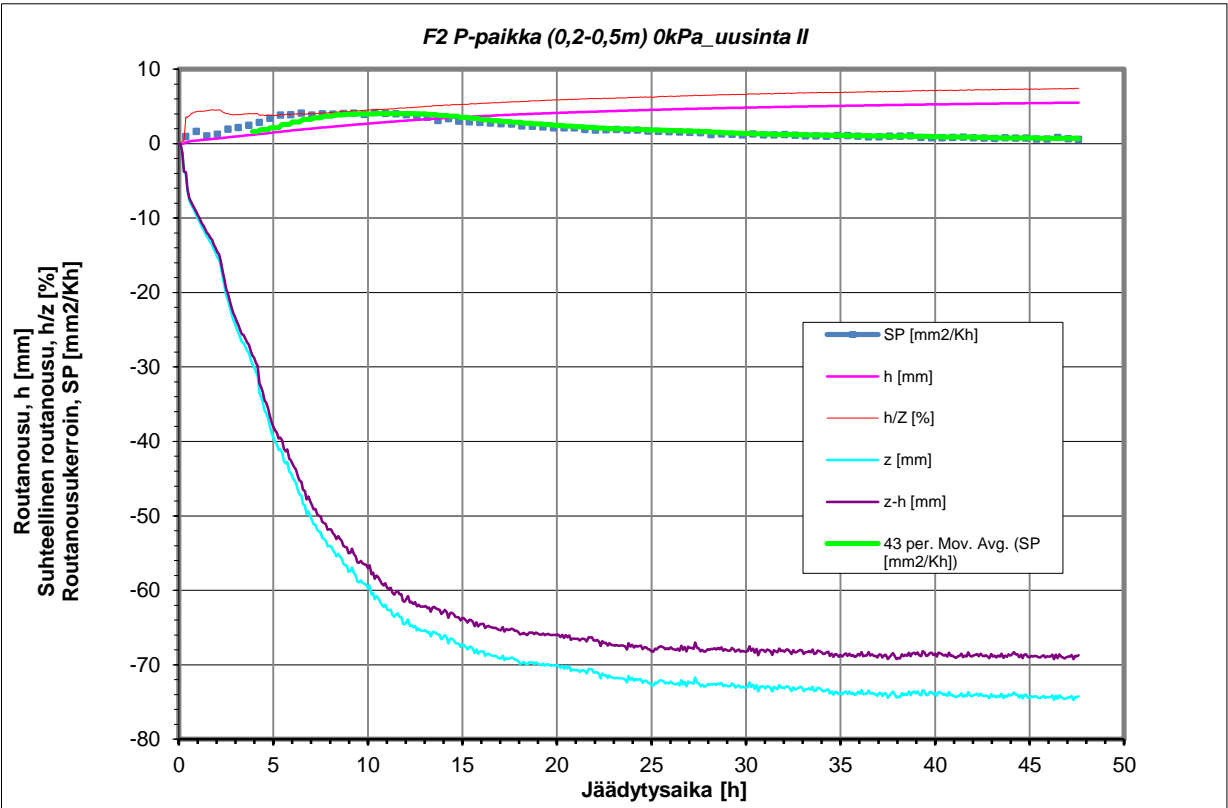
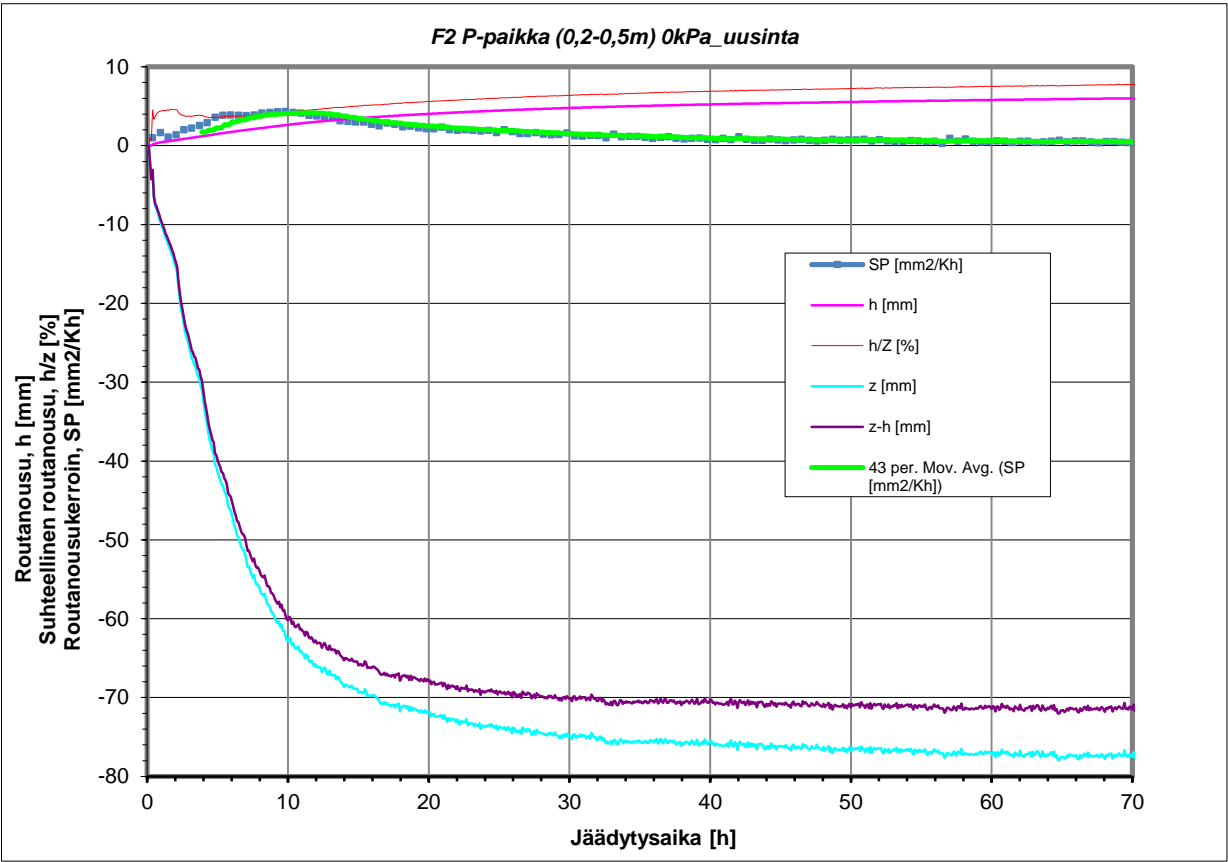
1. Pestään astian pinnat tislattulla vedellä ja esijäähdytetään vesi.
2. Sekoitetaan kokeessa käytettävä puhdas lumi ja tislattu vesi isossa vähintään 300 mm syvässä ja 100 mm leveässä astiassa.

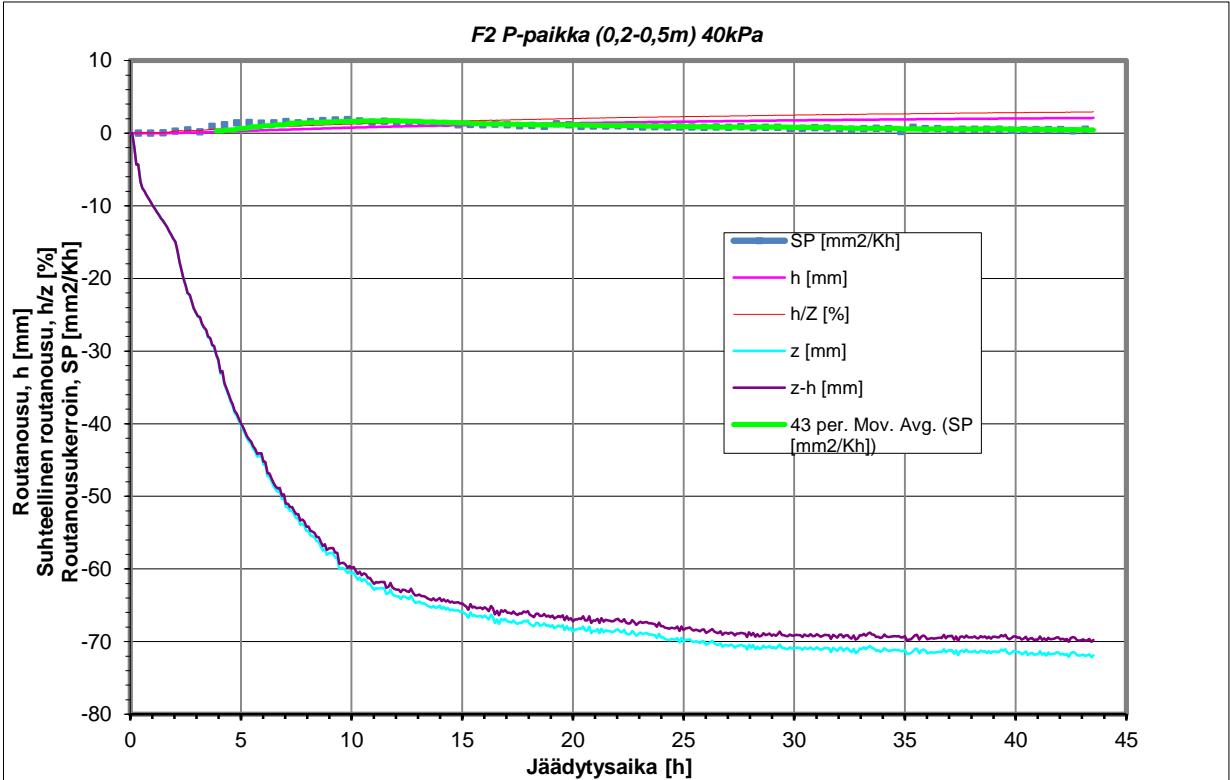
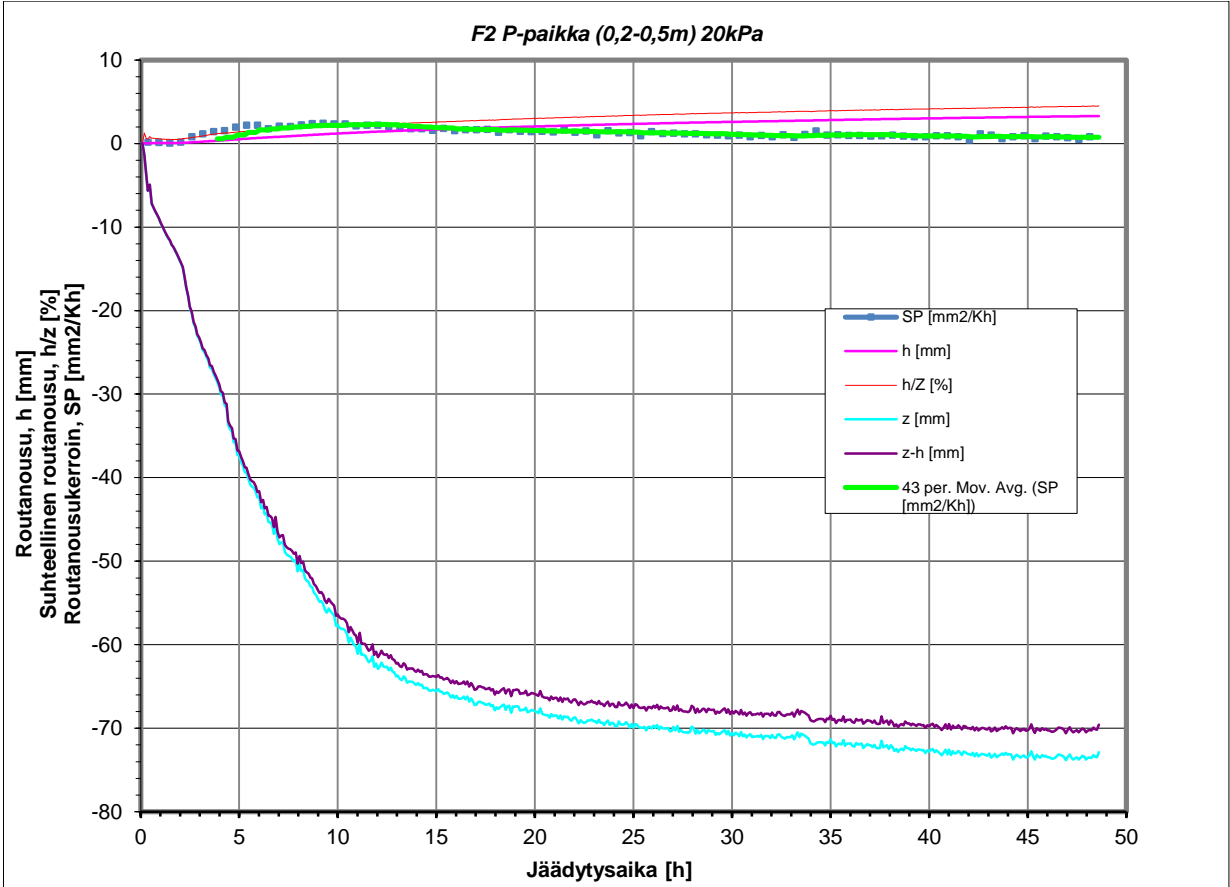
3. Kokeen aikana seosta sekoitetaan käyttämällä sekoitinta.
4. Suoritetaan antureiden ja seoksen lämpötilamittauksia sekä dataloggerin että manuaalisesti lämpötilamittareiden avulla.
5. Kun saavutetaan 0 °C kahden kymmenyksen tarkkuudella eikä lämpötila vaihtele kohtuullisena pidettävän aikavälin sisällä suoritetaan antureiden mitaukset.
6. Kirjataan ja mitataan antureiden mittaamat ja lämpömittareiden antamat lämpötilat. Lasketaan poikkeamat.

Poikkeamia ohjeesta Australian Standard 2091-1981-PT100 ohm Din 43760-EN60 751 ALPHA 0.00385:

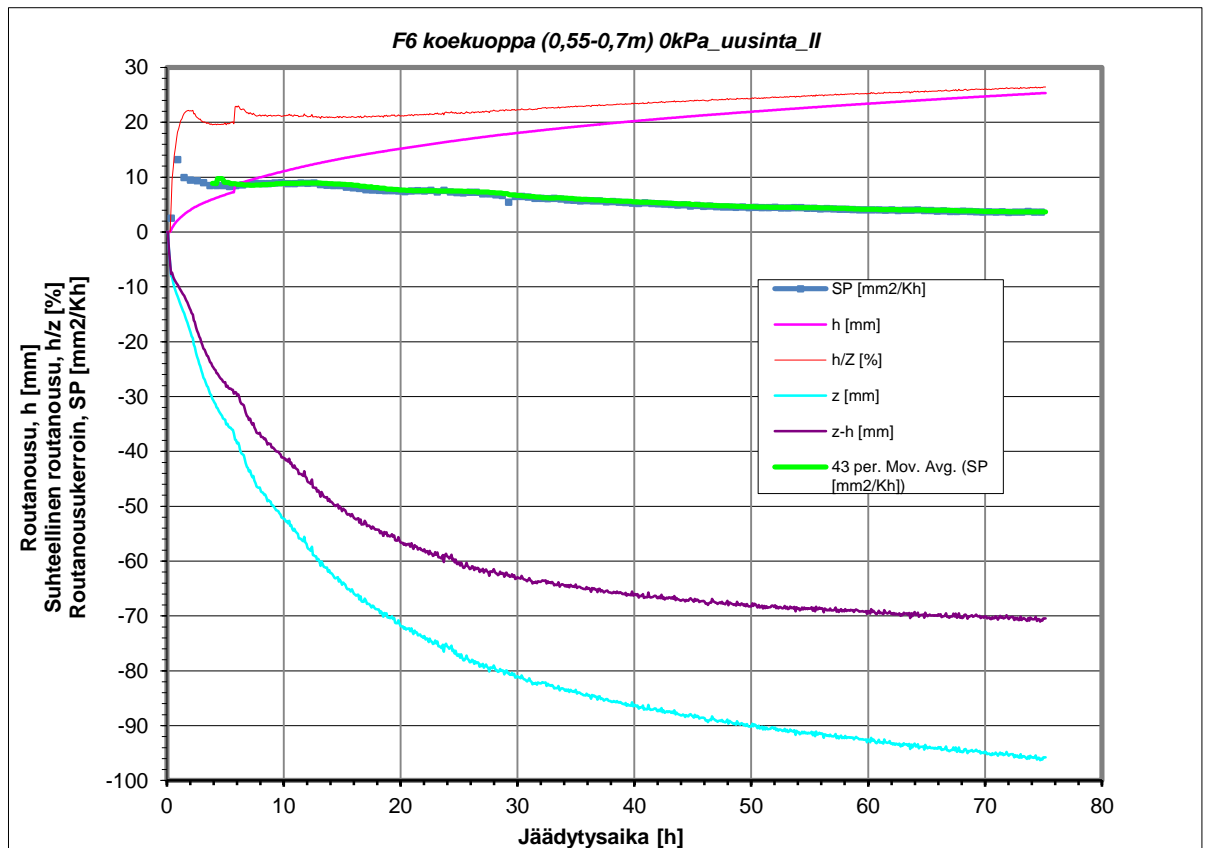
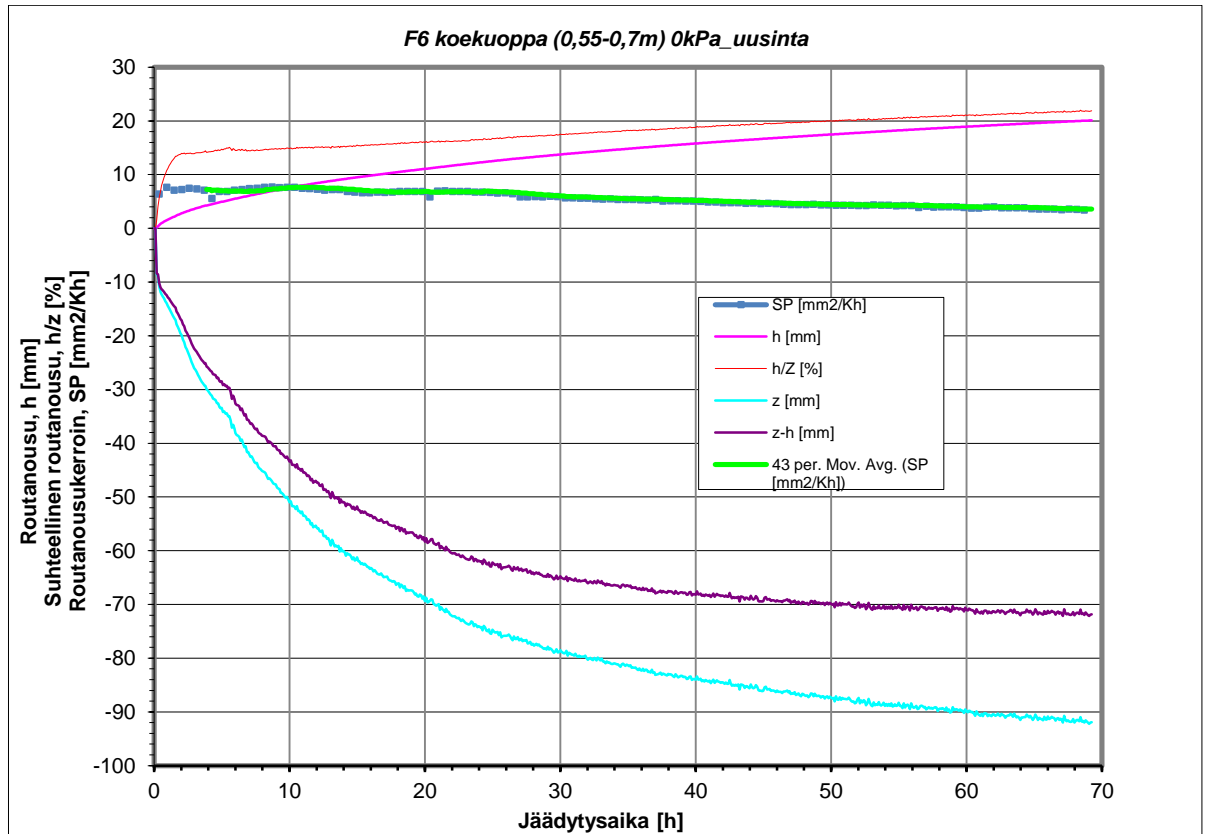
- Käytössä ollut astia ei ollut lämpöeristetty. Säähuoneessa tehty kalibrointi suoritettiin tasalämpöisessä ympäristössä, jossa huonelämpötila vaihteli +1 - 3 °C asteen välillä. Tästä syystä katsottiin, että lämpöeristetty astia ei ole välttämätön kokeen suorituksen kannalta.
- Kalibroinnin kesto oli tutkimuksen yhteydessä huomattavasti pidempi kuin standardin ohjeissa. Tämä johtui routasellin rungon koosta ja massasta. Sellin jäähtyminen ja lämpötasapainotilan saavuttaminen kesti ohjeolosuhteita pidempään.

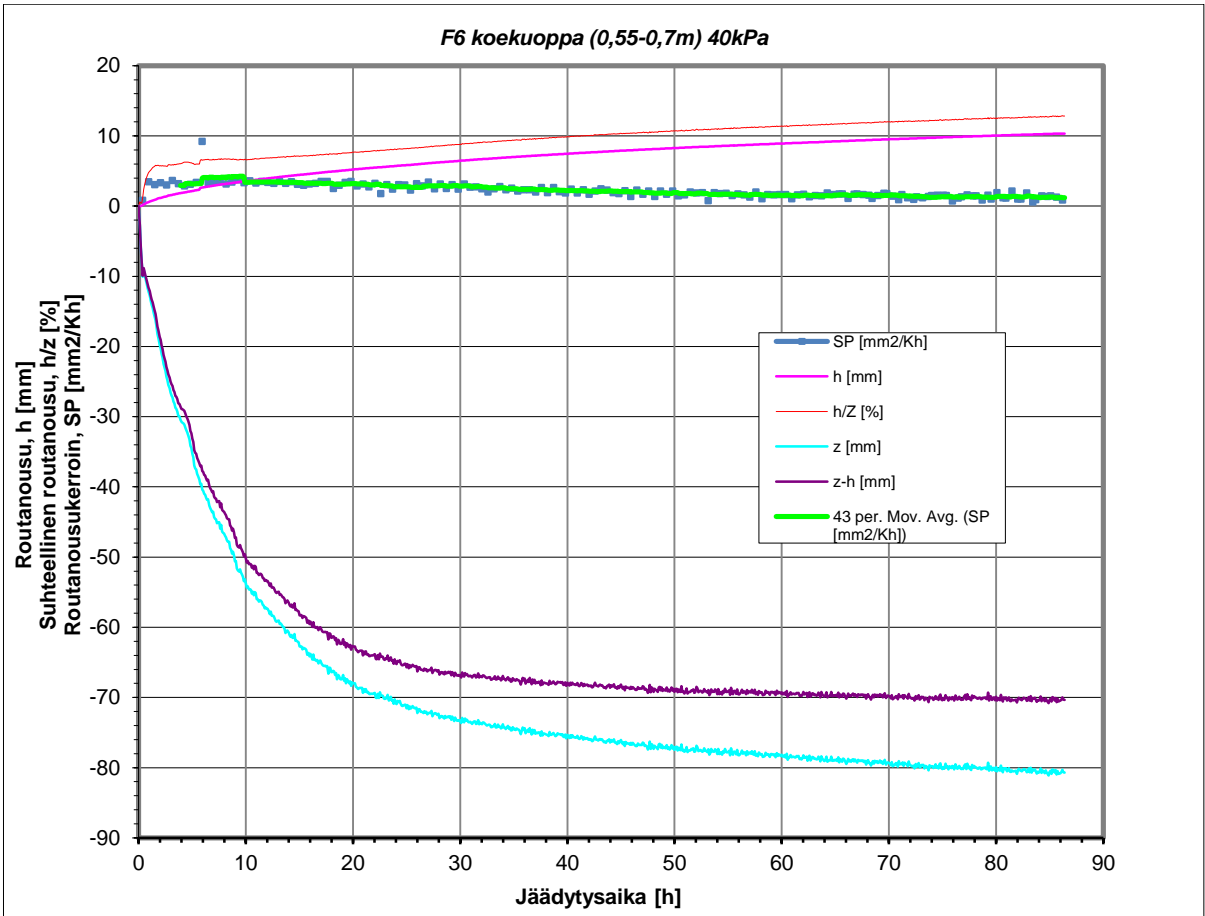
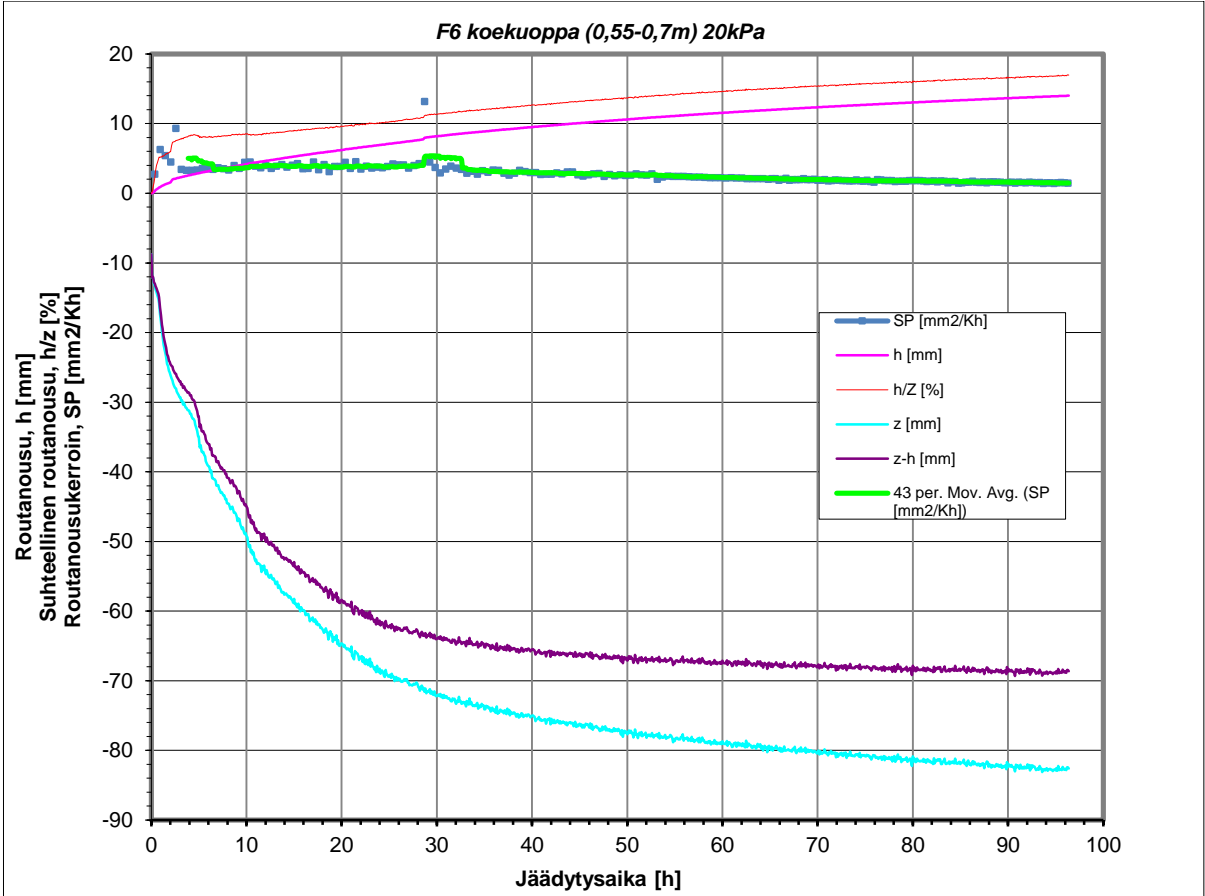
Liite 2. Routanousukokeet, F2-näyte



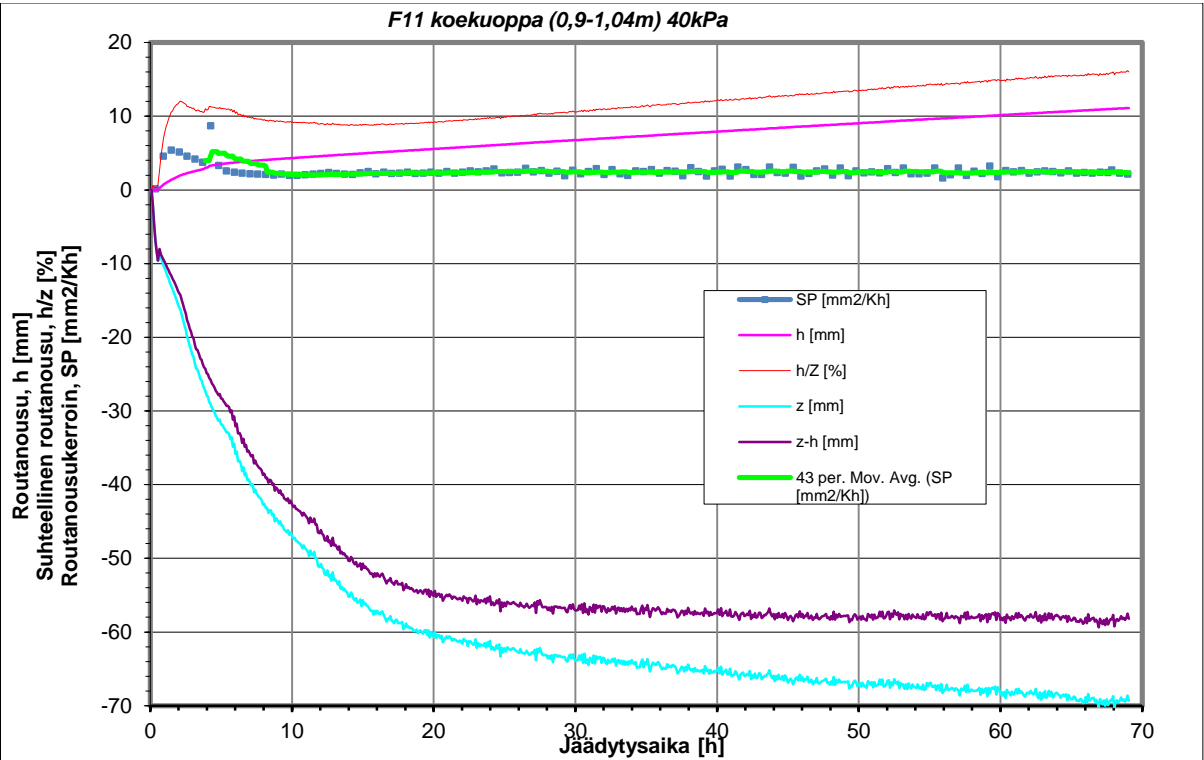
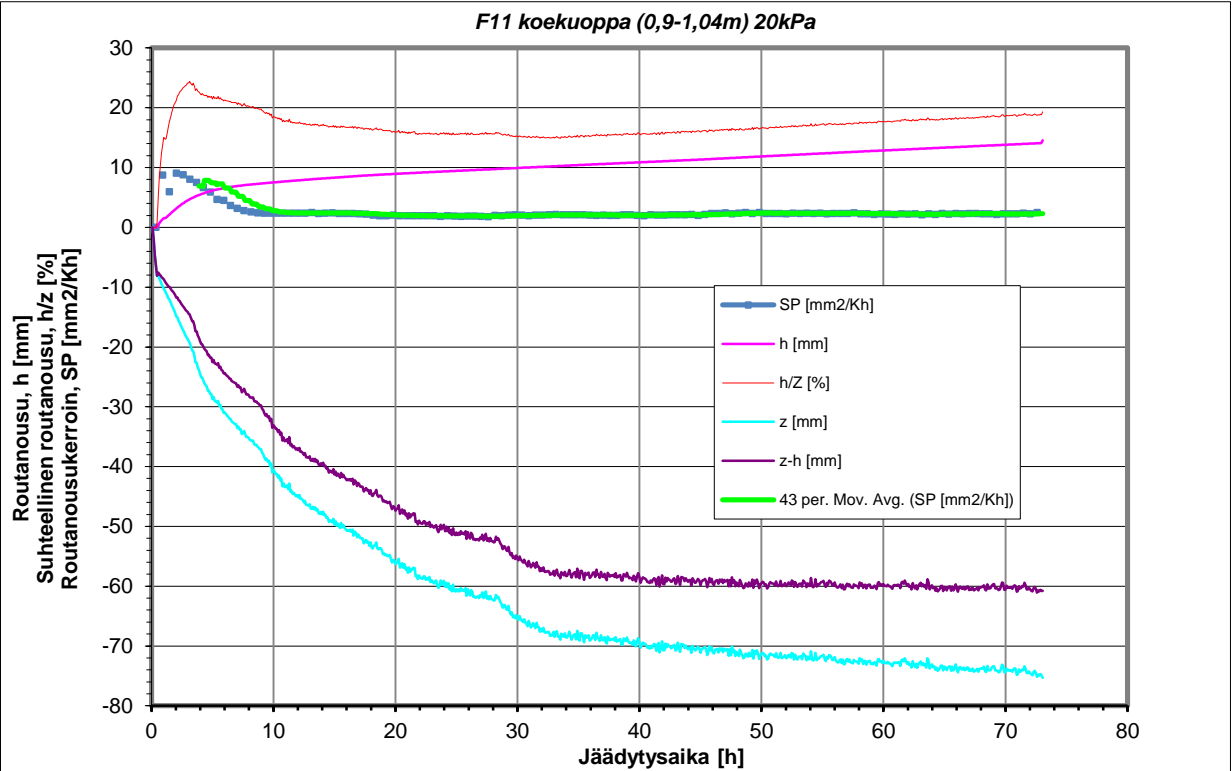


Liite 3. Routanousukokeet, F6-näyte

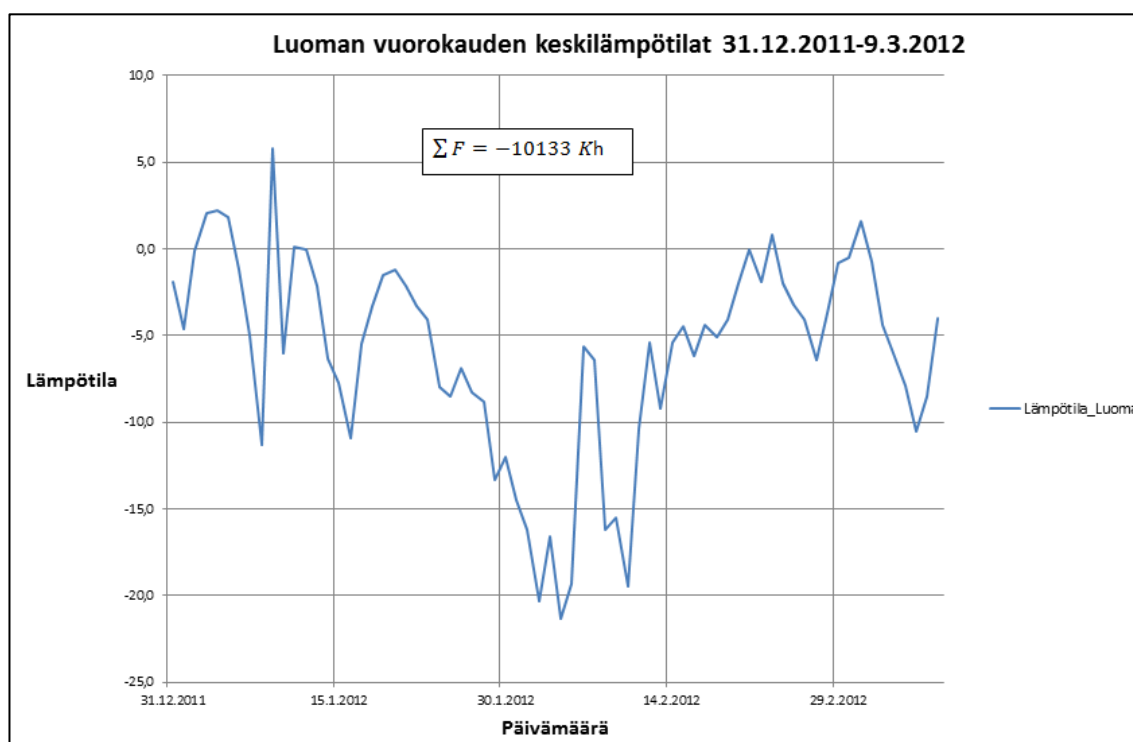
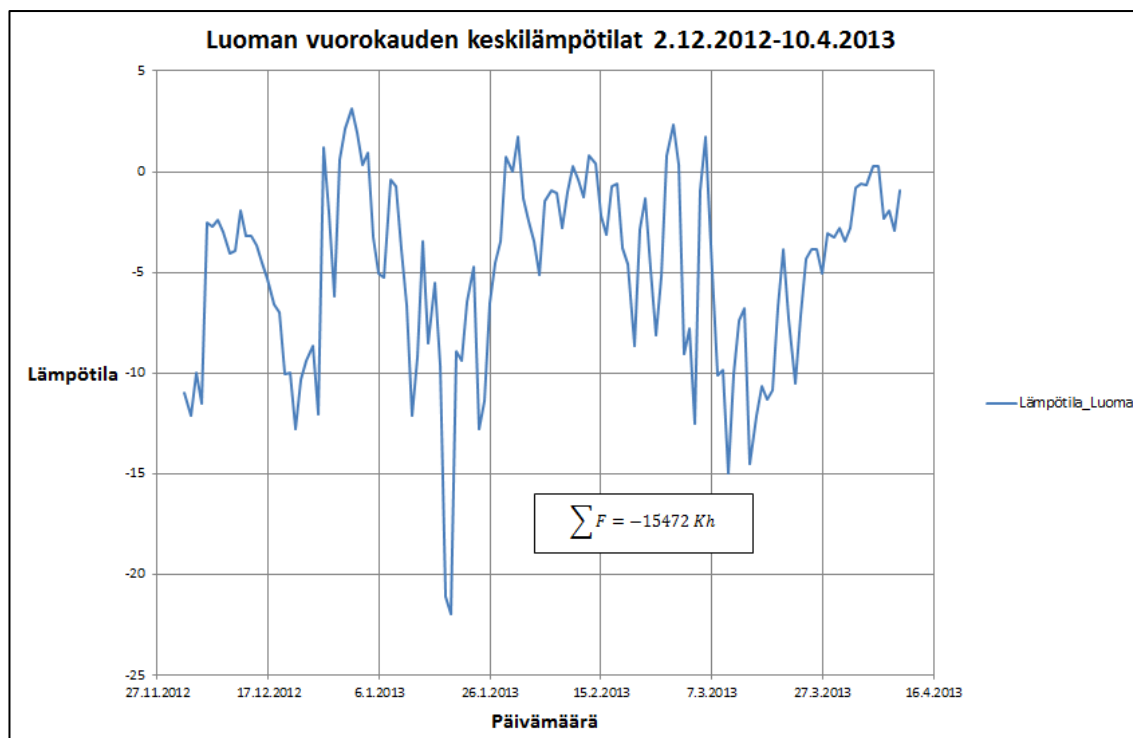




Liite 4. Routanousukokeet, F11-näyte



Liite 5. Luoman ilman lämpötiladataa



Liite 6. Routanousu käsinlaskennalla Luomassa (osasummamenetelmällä)

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **6.2.2012**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_o}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35

m

Roudan YP (MP:stä) 0 m
Roudan AP (MP:stä) 0,77 m

1kerros 0,2-0,5m

Ef	0,059835
d	0,3

2kerros 0,5-0,75m

Ef	0,227495
d	0,25

3kerros 0,75-1,35m

Ef	0,11082
d	0,02

h 0,017951 (m) **h** 0,056874 (m) **h** 0,00222 (m)

Htot(1,2,3) 77,04 mm
 Todellinen max 62,00 mm
 Todellinen min 55,00 mm
 Todellinen ka 58,00 mm

Routanousupisteet	1	62
	2	57 mm
	3	55 mm

Ef on suhteellinen routanousu
 d Maakerroksen jäänytyn osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **12.3.2012**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_o}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35

m

Roudan YP (MP:stä) 0 m
Roudan AP (MP:stä) 0,87 m

1kerros 0,2-0,5m

Ef	0,059835
d	0,3

2kerros 0,5-0,75m

Ef	0,227495
d	0,25

3kerros 0,75-1,35m

Ef	0,11082
d	0,12

h 0,017951 (m) **h** 0,056874 (m) **h** 0,0133 (m)

Htot(1,2,3) 88,12 mm
 Todellinen max 100,00 mm
 Todellinen min 88,00 mm
 Todellinen ka 92,67 mm

Routanousupisteet	1	100
	2	90 mm
	3	88 mm

Ef on suhteellinen routanousu
 d Maakerroksen jäänytyn osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **4.12.2012**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vel}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_o}$$

Itse täytettävät alueet**Routimaton kerros**

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP_0	k -arvo	$Wvol$	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,3	m

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,1	d		d	

h	0,005984 (m)	h	0 (m)	h	0 (m)
----------	--------------	----------	-------	----------	-------

Htot(1,2,3)	5,98	mm
Todellinen max	5,00	mm
Todellinen min	3,00	mm
Todellinen ka	4,33	mm

Routanouspisteet	1	5
	2	5 mm
	3	3 mm

Ef on suhteellinen routanousu
d Maakerroksen jäänytyn osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **13.12.2012**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vel}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_o}$$

Itse täytettävät alueet**Routimaton kerros**

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP_0	k -arvo	$Wvol$	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,38	m

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,18	d		d	

h	0,01077 (m)	h	0 (m)	h	0 (m)
----------	-------------	----------	-------	----------	-------

Htot(1,2,3)	10,77	mm
Todellinen max	15,00	mm
Todellinen min	9,00	mm
Todellinen ka	13,00	mm

Routanouspisteet	1	9
	2	15 mm
	3	15 mm

Ef on suhteellinen routanousu
d Maakerroksen jäänytyn osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **21.12.2012**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vel}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_0} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_0}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP_0	k -arvo	$Wvol$	d (maakerros)
<i>srHkMr</i>	1,5	8	0,144	0,3
<i>saSi(2.)</i>	8,5	9,4	0,39	0,25
<i>laSa(3.)</i>	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,48	m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,28	d		d	
h	0,016754 (m)	h	0 (m)	h	0 (m)

Htot(1,2,3)	16,75	mm
Todellinen max	29,00	mm
Todellinen min	21,00	mm
Todellinen ka	26,00	mm

Routanousupisteet	1	21
	2	29
	3	28

Ef on suhteellinen routanousu
 d Maakerroksen jäätynyt osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **3.1.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vel}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_0} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_0}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP_0	k -arvo	$Wvol$	d (maakerros)
<i>srHkMr</i>	1,5	8	0,144	0,3
<i>saSi(2.)</i>	8,5	9,4	0,39	0,25
<i>laSa(3.)</i>	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,59	m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,39	d	0,09	d	
h	0,023336 (m)	h	0,020475 (m)	h	0 (m)

Htot(1,2,3)	43,81	mm
Todellinen max	47,00	mm
Todellinen min	37,00	mm
Todellinen ka	43,33	mm

Routanousupisteet	1	37
	2	47
	3	46

Ef on suhteellinen routanousu
 d Maakerroksen jäätynyt osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **13.1.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F-z_o}}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,6	m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,4	d	0,1	d	

h	0,023934 (m)	h	0,022749 (m)	h	0 (m)
---	--------------	---	--------------	---	-------

Htot(1,2,3)	46,68 mm
Todellinen max	56,00 mm
Todellinen min	43,00 mm
Todellinen ka	51,67 mm

Routanousupisteet	1	43
	2	56 mm
	3	56 mm

Ef on suhteellinen routanousu
 d Maakerroksen jäätynyt osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **20.1.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F-z_o}}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,8	m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,05

h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,00554 (m)
---	--------------	---	--------------	---	-------------

Htot(1,2,3)	80,37 mm
Todellinen max	72,00 mm
Todellinen min	61,00 mm
Todellinen ka	67,67 mm

Routanousupisteet	1	61
	2	72 mm
	3	70 mm

Ef on suhteellinen routanousu
 d Maakerroksen jäätynyt osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **29.1.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^3} + 0,09w_{vel}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F-z_o}}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,9	m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,15

h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,01662 (m)
---	--------------	---	--------------	---	-------------

Htot(1,2,3)	91,45 mm
Todellinen max	92,00 mm
Todellinen min	79,00 mm
Todellinen ka	86,00 mm

Routanousupisteet	1	79
	2	92 mm
	3	87 mm

Ef	on	suhteellinen routanousu
d		Maakerroksen jäänytyn osuus (m)
h		Maakerroskohtainen routanousu

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **20.2.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^3} + 0,09w_{vel}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F-z_o}}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SRMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,92	m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,17

h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,01884 (m)
---	--------------	---	--------------	---	-------------

Htot(1,2,3)	93,66 mm
Todellinen max	100,00 mm
Todellinen min	85,00 mm
Todellinen ka	94,00 mm

Routanousupisteet	1	85
	2	100 mm
	3	97 mm

Ef	on	suhteellinen routanousu
d		Maakerroksen jäänytyn osuus (m)
h		Maakerroskohtainen routanousu

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **2.3.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol} \quad \text{Saarelainen (1999)}$$

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_o}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP_0	k -arvo	$Wvol$	d (maakerros)
SsrHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,97	m

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,22
h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,02438 (m)

Htot(1,2,3)	99,21 mm
Todellinen max	109,00 mm
Todellinen min	96,00 mm
Todellinen ka	103,67 mm

Routanouspisteet	1	96
	2	109 mm
	3	106 mm

Ef on suhteellinen routanousu
d Maakerroksen jäänytynyt osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Kohde: **Luoma**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **8.3.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol} \quad \text{Saarelainen (1999)}$$

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_o}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP_0	k -arvo	$Wvol$	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0	m
Roudan AP (MP:stä)	0,98	m

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,23
h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,02549 (m)

Htot(1,2,3)	100,31 mm
Todellinen max	113,00 mm
Todellinen min	96,00 mm
Todellinen ka	106,33 mm

Routanouspisteet	1	96
	2	113 mm
	3	110 mm

Ef on suhteellinen routanousu
d Maakerroksen jäänytynyt osuus (m)
 h Maakerroskohtainen routanousu

Kohde: **Luoma**
Tekijä: **Iti**
Pvä: **24.3.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vel}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_o}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0 m
Roudan AP (MP:stä)	1,17 m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,42

h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,04655 (m)
---	--------------	---	--------------	---	-------------

Htot(1,2,3)	121,37 mm
Todellinen max	137,00 mm
Todellinen min	124,00 mm
Todellinen ka	131,33 mm

Routanousupisteet	1	124
	2	137 mm
	3	133 mm

Ef on suhteellinen routanousu
d Maakerroksen jäänytyn osuus (m)
h Maakerroskohtainen routanousu

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma**
Tekijä: **Iti**
Pvä: **1.4.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vel}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F}-z_o}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi(2.)	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa(3.)	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0 m
Roudan AP (MP:stä)	1,18 m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,43

h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,04765 (m)
---	--------------	---	--------------	---	-------------

Htot(1,2,3)	122,48 mm
Todellinen max	143,00 mm
Todellinen min	124,00 mm
Todellinen ka	135,00 mm

Routanousupisteet	1	124 mm
	2	143 mm
	3	138 mm

Ef on suhteellinen routanousu
d Maakerroksen jäänytyn osuus (m)
h Maakerroskohtainen routanousu

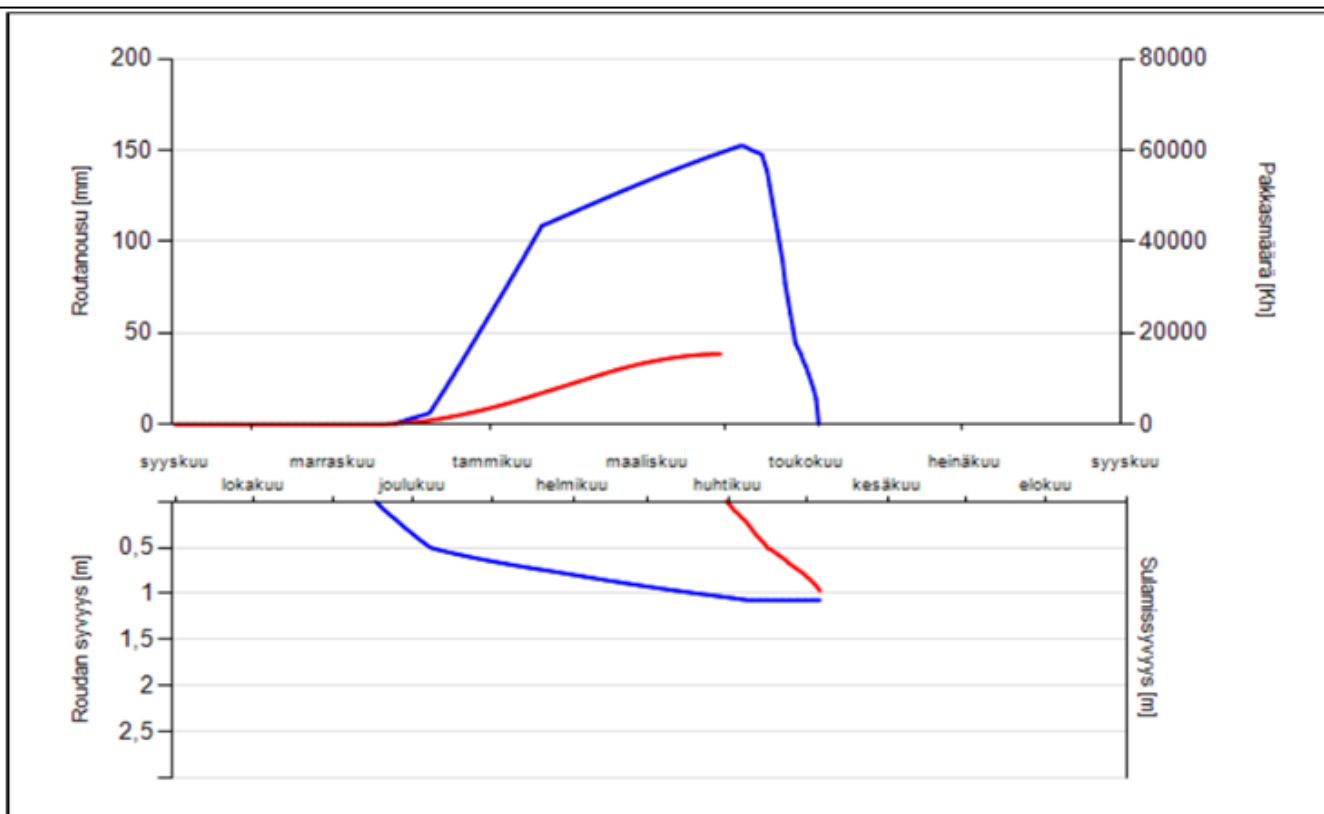
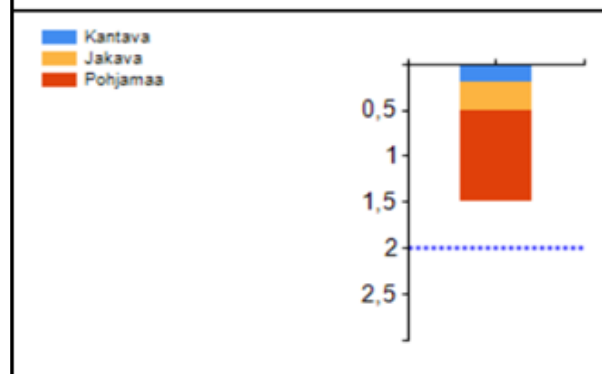
Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Liite 7. GB Frost-laskennat

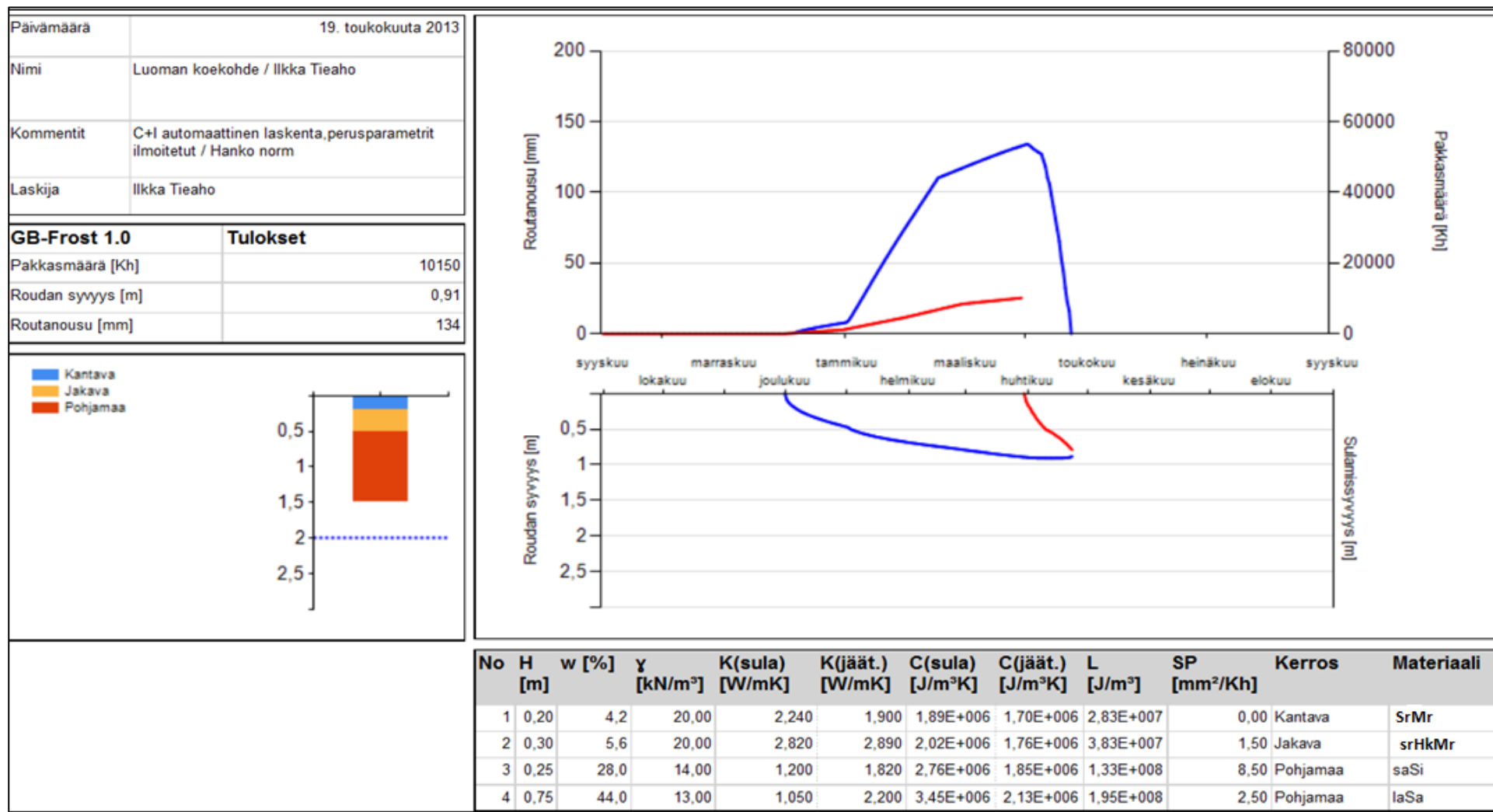
Päivämäärä	19. toukokuuta 2013
Nimi	Luoman koekohde / Ilkka Tieaho
Kommentit	C & L autom laskenta, perusparametrit ilmoitetut / Helsinki - Vantaa F2
Laskija	Ilkka Tieaho

GB-Frost 1.0	Tulokset
Pakkasmäärä [Kh]	15386
Roudan syvyys [m]	1,07
Routanousu [mm]	152

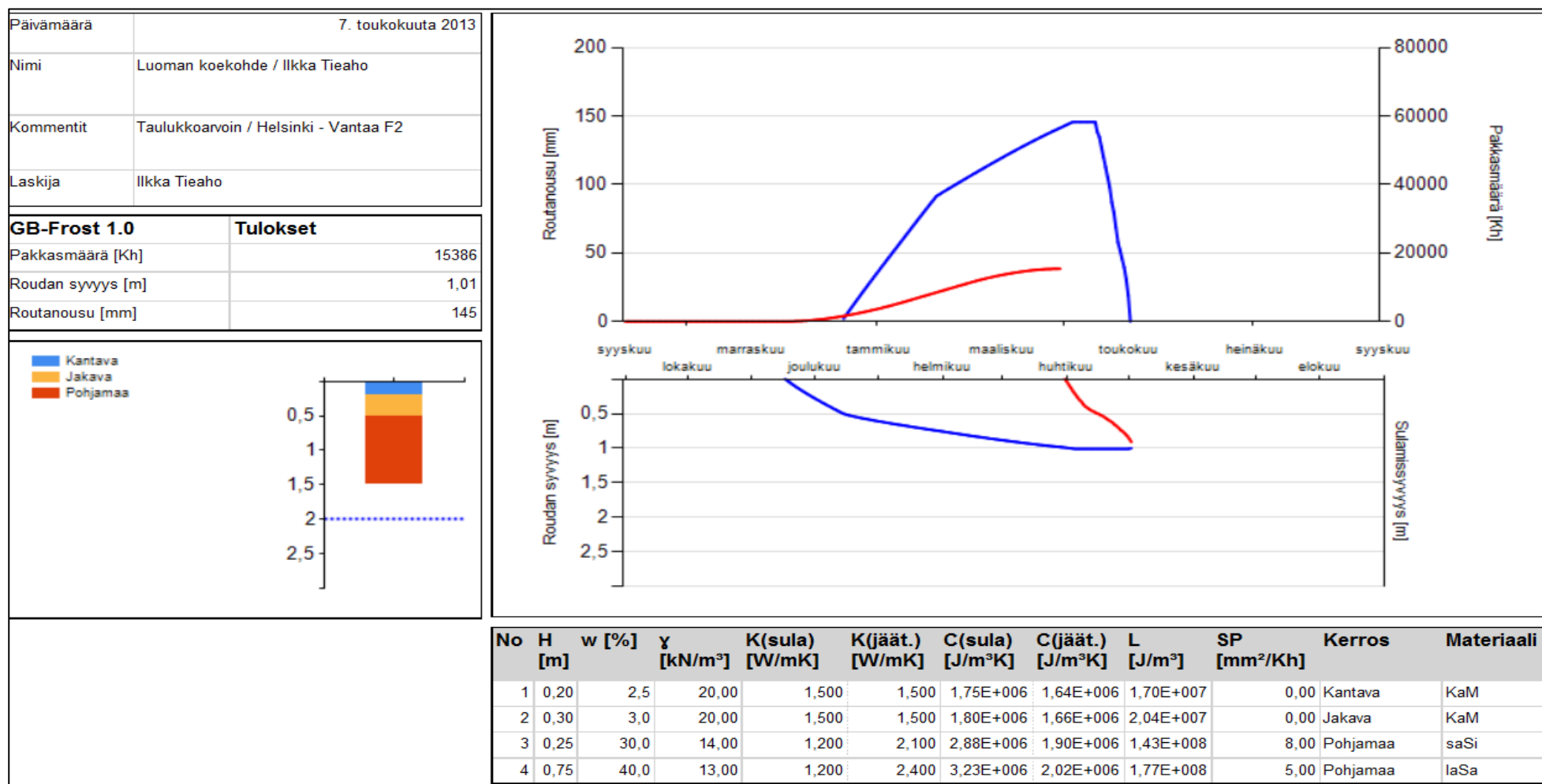


No	H [m]	w [%]	γ [kN/m³]	K(sula) [W/mK]	K(jäät.) [W/mK]	C(sula) [J/m³K]	C(jäät.) [J/m³K]	L [J/m³]	SP [mm²/Kh]	Kerros	Materiaali
1	0,20	4,2	20,00	2,240	1,900	1,89E+006	1,70E+006	2,83E+007	0,00	Kantava	SrMr
2	0,30	5,6	20,00	2,820	2,890	2,02E+006	1,76E+006	3,83E+007	1,50	Jakava	srHkMr
3	0,25	28,0	14,00	1,200	1,820	2,76E+006	1,85E+006	1,33E+008	8,50	Pohjamaa	saSi
4	0,75	44,0	13,00	1,050	2,200	3,45E+006	2,13E+006	1,95E+008	2,50	Pohjamaa	laSa

GB-Frost, talvi 2012-2013.



GB-Frost, talvi 2011-2012.



GB-Frost, talvi 2012-2013, laskenta "taulukkoarvoilla"

Liite 8. Temp/W- routanousulaskennat (osasummamenetelmä)

Kohde: **Luoma/TempW talvi 2012-2013**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **1.1.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F-z_o}}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä) 0 m
Roudan AP (MP:stä) 0,67 m

1kerros 0,2-0,5m

Ef	0,059835
d	0,3

2kerros 0,5-0,75m

Ef	0,227495
d	0,17

3kerros 0,75-1,35m

Ef	0,11082
d	0

h 0,017951 (m) **h** 0,038674 (m) **h** 0 (m)

Htot(1,2,3) 56,62 mm

Ef on suhteellinen routanousu

Htot(1,2,3) routanoususumma kerroksittain

d Maakerroksen jäähtynyt osuus (m)

d Maakerroksen jäähtynyt paksuus, roudan edetessä

h Maakerroskohtainen routanousu

Kohde: **Luoma/TempW talvi 2012-2013**
 Tekijä: **Iti**
 Pvä: **31.1.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F-z_o}}$$

Itse täytettävät alueet

Routimaton kerros

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP ₀	k-arvo	Wvol	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä) 0 m
Roudan AP (MP:stä) 0,835 m

1kerros 0,2-0,5m

Ef	0,059835
d	0,3

2kerros 0,5-0,75m

Ef	0,227495
d	0,25

3kerros 0,75-1,35m

Ef	0,11082
d	0,085

h 0,017951 (m) **h** 0,056874 (m) **h** 0,00942 (m)

Htot(1,2,3) 84,24 mm

Ef on suhteellinen routanousu

Htot(1,2,3) routanoususumma kerroksittain

d Maakerroksen jäähtynyt osuus (m)

d Maakerroksen jäähtynyt paksuus, roudan edetessä

h Maakerroskohtainen routanousu

Kohde: **Luoma/TempW talvi 2012-2013**Tekijä: **Iti**Pvä: **2.3.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F-z_o}}$$

Itse täytettävät alueet**Routimaton kerros**

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP_0	k -arvo	$Wvol$	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0 m
Roudan AP (MP:stä)	0,98 m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,23

h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,02549 (m)
----------	--------------	----------	--------------	----------	-------------

Htot(1,2,3) **100,31 mm**

Ef	on	suhteellinen routanousu	d	Maakerroksen jäähtynyt paksuus, roudan edetessä
Htot(1,2,3)		routanoususumma kerroksittain	h	Maakerroskohtainen routanousu
d		Maakerroksen jäähtynyt osuus (m)		

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$

Kohde: **Luoma/TempW talvi 2012-2013**Tekijä: **Iti**Pvä: **1.4.2013**

$$\varepsilon_f = \frac{2SP}{k^2} + 0,09w_{vol}$$

Saarelainen (1999)

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z-z_o} = \frac{h}{k\sqrt{F-z_o}}$$

Itse täytettävät alueet**Routimaton kerros**

1	SrMr	0,2	mm
2			mm

Routivat maakerrokset

	SP_0	k -arvo	$Wvol$	d (maakerros)
srHkMr	1,5	8	0,144	0,3
saSi	8,5	9,4	0,39	0,25
laSa	2,5	8,9	0,53	0,8
				1,35 m

Roudan YP (MP:stä)	0 m
Roudan AP (MP:stä)	1,2 m

1kerros	0,2-0,5m	2kerros	0,5-0,75m	3kerros	0,75-1,35m
Ef	0,059835	Ef	0,227495	Ef	0,11082
d	0,3	d	0,25	d	0,45

h	0,017951 (m)	h	0,056874 (m)	h	0,04987 (m)
----------	--------------	----------	--------------	----------	-------------

Htot(1,2,3) **124,69 mm**

Ef	on	suhteellinen routanousu	d	Maakerroksen jäähtynyt paksuus, roudan edetessä
Htot(1,2,3)		routanoususumma kerroksittain	h	Maakerroskohtainen routanousu
d		Maakerroksen jäähtynyt osuus (m)		

Aiemmin kappaleessa 2.5.2

$$k = \left(\frac{2\lambda}{q}\right)^{0,5}$$